

CAROLINA PRANDINE DE MOURA

APLICAÇÃO DE REDES NEURONAIS PARA A PREDIÇÃO E  
OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE SECAGEM DE YACON (*Polymnia  
sonchifolia*) COM PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO

Dissertação apresentada como requisito parcial à  
obtenção do grau de mestre em Tecnologia de  
Alimentos, Programa de Pós-Graduação em  
Tecnologia de Alimentos, Setor de Tecnologia da  
Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Maria Lucia Masson

Co-Orientador: Prof. Dr. Carlos Itsuo Yamamoto

CURITIBA  
2004

CAROLINA PRANDINE DE MOURA

APLICAÇÃO DE REDES NEURONAIS PARA A PREDIÇÃO E  
OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE SECAGEM DE YACON (*Polymnia  
sonchifolia*) COM PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO

Dissertação apresentada como requisito parcial à  
obtenção do grau de mestre em Tecnologia de  
Alimentos, Programa de Pós-Graduação em  
Tecnologia de Alimentos, Setor de Tecnologia da  
Universidade Federal do Paraná

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Maria Lucia Masson

Co-Orientador: Prof. Dr. Carlos Itsuo Yamamoto

CURITIBA  
2004

## **AGRADECIMENTOS**

Muito obrigado ao nosso Senhor Deus todo poderoso, amigo fiel que nos transmite confiança e coragem para alcançarmos as estrelas, realizar nossos sonhos, superarmos nossas dificuldades e vencermos nossos desafios.

A minha amada família Norival, Maria Ângela, Ana Paula e Fernando, que representam a minha força, capacidade e responsabilidade.

Ao Jessé, pelo carinho e compreensão nestes anos.

Aos meus amigos e orientadores Maria Lucia Masson e Carlos Itsuo Yamamoto que estiveram sempre ao meu lado me fornecendo as dificuldades necessárias ao meu desenvolvimento.

Aos meus queridos colegas, Joana, Leda, Lílian, Assuan, Prof Wanderlei Amaral, funcionários do CEPPA que contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Alimentos pela chance de mostrar meu trabalho.

A CAPES por fornecer condições financeiras para minha total dedicação.

Meu muito obrigado a todos aqueles que de alguma forma me ajudaram no desenvolvimento desta dissertação.

**Muito Obrigado.**

**Nós nos transformamos naquilo que praticamos com frequência. A perfeição, portanto, não é um ato isolado. É um hábito.**

**(Aristóteles)**

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>x</b>
<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES.....</b>	<b>xiii</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xiv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xv</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>3</b>
2.1 YACON.....	3
2.1.1 Aspectos gerais.....	3
2.1.2 Características botânicas.....	4
2.1.3 Composição química e valor alimentício.....	5
2.2 SECAGEM DE ALIMENTOS.....	7
2.3 DESIDRATAÇÃO OU PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO.....	8
2.3.1 Princípio do método.....	9
2.3.2 Variáveis do processo.....	11
2.3.2.1 Agentes desidratantes.....	11
2.3.2.2 Temperatura.....	12
2.3.2.3 Tempo de imersão.....	13
2.3.2.4 Agitação.....	14
2.4 SECAGEM CONVECTIVA.....	14
2.4.1 Períodos da secagem convectiva.....	15
2.4.2 Cinética de secagem.....	16
2.4.3 Secagem osmo-convectiva.....	17
2.5 REDES NEURONAIS.....	18
2.5.1 Histórico.....	20
2.5.2 Classificação das redes neuronais.....	21
2.5.3 Estrutura básica.....	22
2.5.4 Treinamento e otimização.....	28
2.5.5 Redes neuronais e a tecnologia de alimentos.....	28
<b>3. COMPOSIÇÃO FÍSICO QUÍMICA DA YACON.....</b>	<b>31</b>
3.1 INTRODUÇÃO.....	31
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	32
3.2.1 Material.....	32
3.2.2 Métodos.....	32
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
3.4 CONCLUSÃO.....	34
<b>4. PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO.....</b>	<b>35</b>
4.2 OBJETIVO.....	35
4.3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	36

<b>4.3.1 Material.....</b>	<b>36</b>
<b>4.3.2 Método.....</b>	<b>37</b>
4.3.2.1 Determinação de parâmetros característicos do pré-tratamento osmótico.....	37
4.3.2.2 Determinação do tempo de pré-tratamento osmótico.....	38
<b>4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>38</b>
<b>4.4.1 Determinação do tempo de pré-tratamento osmótico.....</b>	<b>38</b>
<b>4.5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>43</b>
<b>5. SECAGEM CONVECTIVA.....</b>	<b>44</b>
5.1 INTRODUÇÃO.....	44
5.2 OBJETIVO.....	45
5.3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
<b>5.3.1 Matéria-prima.....</b>	<b>45</b>
5.3.2 Método.....	45
5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
5.5 CONCLUSÃO.....	58
<b>6. REDES NEURONAIS.....</b>	<b>59</b>
6.1 INTRODUÇÃO.....	59
6.2 OBJETIVO.....	60
6.3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	60
<b>6.3.1 Análise de dados.....</b>	<b>63</b>
<b>6.3.2 Programa de rede neuronal.....</b>	<b>64</b>
<b>6.3.3 Predição das condições do pré-tratamento osmótico e secagem convectiva.....</b>	<b>65</b>
6.3.3.1 Pré-tratamento osmótico.....	65
6.3.3.2 Secagem convectiva.....	66
<b>6.3.4 Otimização das condições do pré-tratamento osmótico e da secagem convectiva.....</b>	<b>67</b>
6.4 RESULTADOS.....	68
<b>6.4.1 Tratamento estatístico.....</b>	<b>68</b>
<b>6.4.2 Treinamento da rede neuronal.....</b>	<b>70</b>
6.4.2.1 Pré-tratamento osmótico.....	71
6.4.2.1.1 Ganho de sólidos.....	71
6.4.2.1.2 Redução de peso.....	74
6.4.2.2 Secagem convectiva.....	76
<b>6.4.3 Otimização do processo... ..</b>	<b>78</b>
6.4.3.1 Pré-tratamento osmótico.....	78
6.4.3.2 Secagem Convectiva.....	81
6.5 CONCLUSÃO.....	82
<b>7. CONCLUSÃO.....</b>	<b>83</b>
<b>8. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>84</b>

APÊNDICE 1 – BANCO DE DADOS E GRÁFICOS GERADOS PELO MODELO DE REDE NEURONAL PARA A VARIÁVEL GANHO DE SÓLIDOS.....	93
APÊNDICE 2 – BANCO DE DADOS E GRÁFICOS GERADOS PELO MODELO DE REDE NEURONAL PARA A VARIÁVEL DEPENDENTE REDUÇÃO DE PESO.....	96
APÊNDICE 3 - BANCO DE DADOS E GRÁFICOS GERADOS PELO MODELO DE REDE NEURONAL PARA A VARIÁVEL DEPENDENTE TEMPO, NA SECAGEM CONVECTIVA.....	98

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 -	COMPOSIÇÃO QUÍMICA MÉDIA DA YACON.....	6
TABELA 2.2 -	COMPARAÇÃO ENTRE COMPUTADORES E NEUROCOMPUTADORES.....	19
TABELA 3.1 -	PARÂMETROS FÍSICOS E QUÍMICOS DA YACON.....	33
TABELA 4.1 -	CONDIÇÕES DO PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO PARA DETERMINAÇÃO DE PARAMETROS DA CINÉTICA.....	38
TABELA 6.1 -	GANHO DE SÓLIDOS E REDUÇÃO DE PESO DO YACON DE ACORDO COM O DELINEAMENTO EXPERIMENTAL COM PRÉ- TRATAMENTO OSMÓTICO.....	65
TABELA 6.2 -	IDENTIFICAÇÃO DOS NÍVEIS.....	66
TABELA 6.3 -	DETERMINAÇÃO DA REDUÇÃO DE PESO (WR) DAS FATIAS DE YACON PARA CÁLCULO DO TESTE DE REPETIBILIDADE EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO....	68
TABELA 6.4 -	TESTE DE REPETIBILIDADE PARA CÁLCULO DA INCERTEZA NA DETERMINAÇÃO DA REDUÇÃO DE PESO (WR).....	68
TABELA 6.5 -	DETERMINAÇÃO DO GANHO DE SÓLIDO (SG) DAS FATIAS DE YACON PARA CÁLCULO DO TESTE DE REPETIBILIDADE EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO....	69
TABELA 6.6 -	TESTE DE REPETIBILIDADE PARA CÁLCULO DA INCERTEZA NA DETERMINAÇÃO DO GANHO DE SÓLIDOS (SG).....	69
TABELA 6.7 -	DETERMINAÇÃO PORCENTAGEM DE PESO DAS AMOSTRAS DE YACON EM RELAÇÃO À MASSA NO TEMPO (T=0) EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	69
TABELA 6.8 -	TESTE DE REPETIBILIDADE PARA CÁLCULO DA INCERTEZA NA SECAGEM OSMOCONVECTIVA.....	70
TABELA 6.9 -	PARÂMETROS DA CONFIGURAÇÃO ESCOLHIDA PARA REPRESENTAR O GANHO DE SÓLIDOS DURANTE O PRÉ- TRATAMENTO OSMÓTICO.....	72
TABELA 6.10 -	PARAMETROS DA CONFIGURAÇÃO ESCOLHIDA PARA REPRESENTAR A REDUÇÃO DO PESO DURANTE O PRÉ- TRATAMENTO OSMÓTICO.....	74
TABELA 6.11 -	PARAMETROS DA CONFIGURAÇÃO ESCOLHIDA PARA REPRESENTAR O TEMPO PARA ATINGIR 10% DE UMIDADE DA YACON NA SECAGEM CONVECTIVA.....	77
TABELA 6.12 -	CONDIÇÕES DE PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO PARA O MAIOR E MENOR GANHO DE SÓLIDOS DA VARIÁVEL DEPENDENTE.....	80
TABELA 6.13 -	CONDIÇÕES DE PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO PARA A MAIOR E MENOR REDUÇÃO DE PESO DA VARIÁVEL DEPENDENTE.....	81



TABELA 6.14 - CONDIÇÕES DA SECAGEM CONVECTIVA PARA OBTER O MENOR E MAIOR TEMPO PARA ATINGIR 10% DE UMIDADE EM FUNÇÃO DA MASSA INICIAL.....	82
--	----

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 –	YACON DESIDRATADA COMERCIALIZADA PELO CHILE A U\$18.4 / 100 GRAMAS.....	1
FIGURA 2.1 -	FLOR DO YACON E GEMAS CAULINARES.....	5
FIGURA 2.2 –	REPRESENTAÇÃO DE UMA CÉLULA NERVOSA.....	19
FIGURA 2.3 -	ARQUITETURA DE UMA REDE NEURONAL DO TIPO (a) <i>FEEDFORWARD</i> E (b) RECORRENTE.....	22
FIGURA 2.4 –	MODELO NÃO LINEAR DE UM NEURÔNIO.....	23
FIGURA 2.5-	FUNÇÕES DE TRANSFERENCIA UTILIZADAS PELO PROGRAMA DE REDE NEURONAL.....	25
FIGURA 4.1 –	BANHO TERMOSTÁTICO UTILIZADO PARA OS EXPERIMENTOS DO PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO.....	37
FIGURA 4.2 –	CINÉTICA DE GANHO DE SÓLIDO DURANTE 3 HORAS DE PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO.....	39
FIGURA 4.3 –	TAXA DO GANHO DE SÓLIDOS DA YACON DURANTE 3 HORAS DE PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO.....	41
FIGURA 4.4 –	PERDA DE ÁGUA DA YACON EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO.....	41
FIGURA 4.5 –	TAXA DE PERDA DE ÁGUA DA YACON EM DIFERENTES CONDIÇÕES.....	42
FIGURA 4.6 –	REDUÇÃO DO PESO DA YACON DURANTE O PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE TEMPERATURA, ESPESSURA E CONCENTRAÇÃO.....	44
FIGURA 5.1 –	ILUSTRAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA EXPERIMENTAÇÃO.....	46
FIGURA 5.2 –	ESQUEMA DAS CONDIÇÕES DO PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO UTILIZADO PARA A SECAGEM CONVECTIVA.....	46
FIGURA 5.3 –	ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO SECADOR CONVECTIVO.....	47
FIGURA 5.4 –	PROPORÇÃO DE GANHO DE SÓLIDOS E RETIRADA DE ÁGUA DURANTE O PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO PARA AS DETERMINADAS CONDIÇÕES (TEMPERATURA. ESPESSURA. CONCENTRAÇÃO).....	48
FIGURA 5.5 –	GRÁFICO DA SECAGEM OSMO-CONVECTIVA DA YACON COM TEMPERATURA, ESPESSURA E CONCENTRAÇÃO DE 30°C, 2 mm E 30 °BRIX.....	49
FIGURA 5.6 –	GRÁFICO DA SECAGEM OSMO-CONVECTIVA DA YACON COM TEMPERATURA, ESPESSURA E CONCENTRAÇÃO DE 30°C, 2 mm E 50 °BRIX.....	50
FIGURA 5.7 –	GRÁFICO DA SECAGEM OSMO-CONVECTIVA DA YACON	

	COM TEMPERATURA, ESPESSURA E CONCENTRAÇÃO DE 30°C, 5 mm E 30 °BRIX.....	51
FIGURA 5.8 –	GRÁFICO DA SECAGEM OSMO-CONVECTIVA DA YACON COM TEMPERATURA, ESPESSURA E CONCENTRAÇÃO DE 30°C, 5 mm E 50 °BRIX.....	51
FIGURA 5.9 –	TAXA DE SECAGEM OSMO-CONVECTIVA DA YACON COM TEMPERATURA, ESPESSURA E CONCENTRAÇÃO DE 30°C, 2 mm E 30 °BRIX.....	52
FIGURA 5.10 –	TAXA DE SECAGEM OSMO-CONVECTIVA DA YACON COM TEMPERATURA, ESPESSURA E CONCENTRAÇÃO DE 30°C, 2 mm E 50°BRIX.....	53
FIGURA 5.11 –	TAXA DE SECAGEM OSMO-CONVECTIVA DA YACON COM TEMPERATURA, ESPESSURA E CONCENTRAÇÃO DE 30°C, 5 mm E 30°BRIX.....	54
FIGURA 5.12 –	TAXA DE SECAGEM OSMO-CONVECTIVA DA YACON COM TEMPERATURA, ESPESSURA E CONCENTRAÇÃO DE 30°C, 5 mm E 50°BRIX.....	54
FIGURA 5.13 –	CURVA DE SECAGEM CONVECTIVA DAS FATIAS DE YACON COM 2mm DE ESPESSURA SEM PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO.....	55
FIGURA 5.14 –	CURVA DE SECAGEM CONVECTIVA DAS FATIAS DE YACON COM 5mm DE ESPESSURA SEM PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO.....	56
FIGURA 5.15 –	TAXA DE SECAGEM CONVECTIVA DAS FATIAS DE YACON DE 2mm DE ESPESSURA SEM PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO.....	56
FIGURA 5.16 –	TAXA DE SECAGEM CONVECTIVA DAS FATIAS DE YACON DE 5mm DE ESPESSURA SEM PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO.....	57
FIGURA 5.17 -	FOTOS DA YACON IN NATURE, COM E SEM PRÉ-TRATAMENTO NAS CONDIÇÕES DE 30 °C, 3 mm, 50 °Brix DE PRÉ-TRATAMENTO E 50 °C NA SECAGEM CONVECTIVA.....	58
FIGURA 6.1 -	ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO PARA OBTENÇÃO DE YACON DESIDRATADA.....	62
FIGURA 6.2 –	ESQUEMA DAS CONDIÇÕES DO PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO UTILIZADO PARA A SECAGEM CONVECTIVA.....	66
FIGURA 6.3 –	ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO SECADOR CONVECTIVO.....	67
FIGURA 6.4 -	ILUSTRAÇÃO DA VARIAÇÃO DO ERRO DE TREINAMENTO E TESTE DURANTE O APRENDIZADO DA REDE NEURONAL.....	74
FIGURA 6.5 –	VALORES OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE E VALORES CALCULADOS PELA REDE COM RELAÇÃO AO GANHO DE	

	SÓLIDOS NA CONDIÇÃO DO PRÉ-TRATAMENTO.....	73
FIGURA 6.6 –	DESVIO RELATIVO ENTRE OS VALORES OBTIDOS E OS CALCULADOS PELA REDE NEURONAL PARA O GANHO DE SÓLIDOS.....	73
FIGURA 6.7 –	VALORES OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE E VALORES CALCULADOS PELA REDE COM RELAÇÃO À PERDA DE MASSA NA CONDIÇÃO DO PRÉ-TRATAMENTO.....	75
FIGURA 6.8 –	DESVIO RELATIVO ENTRE OS VALORES OBTIDOS E OS CALCULADOS PELA REDE NEURONAL.....	75
FIGURA 6.9 –	VALORES OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE E VALORES CALCULADOS PELA REDE COM RELAÇÃO AO TEMPO NA SECAGEM CONVECTIVA NA CONDIÇÃO DO PRÉ- TRATAMENTO.....	77
FIGURA 6.10 –	DESVIO RELATIVO ENTRE OS VALORES OBTIDOS E OS CALCULADOS PELA REDE NEURONAL COM RELAÇÃO AO TEMPO... ..	78
FIGURA 6.11 -	PONTO CALCULADO PELO PONTO EXPERIMENTAL PELA REDE TREINADA ESCOLHIDA NA OTIMIZAÇÃO PARA O GANHO DE SÓLIDOS.....	79
FIGURA 6.12 -	DESVIO DE PREVISÃO ENTRE PONTOS CALCULADOS E EXPERIMENTAIS NA OTIMIZAÇÃO PARA O GANHO DE SÓLIDOS.....	79
FIGURA 6.13 -	PONTO CALCULADO PELO PONTO EXPERIMENTAL PELA REDE TREINADA ESCOLHIDA PARA A REDUÇÃO DE PESO..	80
FIGURA 6.14 -	DESVIO DE PREVISÃO ENTRE PONTOS CALCULADOS E EXPERIMENTAIS PARA A REDUÇÃO DE PESO.....	81

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

$\bar{x}$	Média aritmética
DII	Desidratação por impregnação
$dx/dt$	Taxa de secagem (g/g g.m.s.min)
E	Erro quadrático de treinamento
FOS	Frutooligossacarídeos
M	Número de neurônios na camada oculta
m	Número de iterações
$M_{(t + \Delta t)}$	Massa total no tempo (t) (g)
$M_{(t)}$	Massa total (g)
$M_{so}$	Massa seca inicial (gi m.s)
$M_s$	Massa seca total no tempo (t) (g m.s)
N	Número de variáveis de entrada
N	Número de observações para treinamento ou teste
NP	Número de pontos do conjunto de treinamento
$O_j$	Valor previsto pela rede neuronal
P	Número de saídas da rede neuronal
S	Desvio padrão
SG	Ganho de sólidos (g/gi.m.s.)
$S_j$	Somador
t	Tempo (hora, h)
$t_{\alpha/2}$	Parâmetro estatístico, tabela de distribuição <i>t-student</i>
WL	Percentual de perda de água (g/gi.m.s.)
WR	Redução de peso no pré-tratamento osmótico (g/gi.m.s.)
X	Dados de entrada da rede neuronal
x	Termo adimensional de umidade (g/g.m.s.)
$x_i$	Resultado da medição
Y	Valor experimental
$\eta$	Fator de aprendizagem

## RESUMO

O processo de pré-tratamento osmótico vem sendo estudado devido às contribuições que ele oferece ao alimento quando seco através de outros processos de secagem como a convectiva. O tubérculo de yacon é um alimento que tem mostrado propriedades prebióticas por causa dos frutooligossacarídeos, fonte de minerais como potássio e cálcio entre outras propriedades. O proposto neste trabalho não é a caracterização das propriedades funcionais do yacon. Mas, uma tecnologia pós-colheita que estabilize as reações no tubérculo de forma rápida, como a secagem, a qual pode ajudar na melhor conservação dos frutooligossacarídeos. Este trabalho de dissertação visa à determinação da cinética de transferência de massa do pré-tratamento osmótico, a avaliação da influência das variáveis independentes como espessura da fatia, concentração e temperatura da solução osmótica usando o sorbitol como agente desidratante, a determinação do processo de secagem do yacon com e sem pré-tratamento osmótico, a predição e otimização através do modelo de redes neurais do pré-tratamento osmótico a partir das variáveis independentes, espessura das fatias, concentração e temperatura da solução osmótica e treinar uma rede para a secagem convectiva com o objetivo de prever a melhor temperatura necessária para minimizar o tempo de secagem. Com duas horas de pré-tratamento foi possível a máxima transferência de massa entre as fatias e a solução. O pré-tratamento osmótico contribuiu na redução do tempo de secagem convectiva e na aparência final do produto. O aumento da temperatura da solução osmótica demonstrou ter influência negativa na retirada de água do produto e no menor ganho de sólidos durante o pré-tratamento. O modelo de redes neurais foi eficiente na predição e otimização do processo de secagem convectiva com pré-tratamento osmótico.

Palavras-chave: yacon, pré-tratamento osmótico, secagem convectiva, rede neuronal.

## **ABSTRACT**

The process of osmotic pre-treatment has been studied due the contributions it offers to the food when submitted to other drying process as the convective. The yacon roots has been showing prebiotics properties because of the fructooligosaccharides, its concentration in minerals as potassium and calcium among other. The proposed in this work is not the characterization of the functional properties of the yacon, but the development of a post harvest technology that stabilizes the reactions in the roots, as the convective drying, which can help in the best conservation of the fructooligosaccharides. This work seeks the determination of the kinetics of the osmotic pre-treatment mass transfer. The influence of the independent variables, slice thickness, osmotic solution concentration and temperature using the sorbitol as dehydrating agent. The determination of the drying process of the yacon with and without osmotic pre-treatment. The prediction and optimization of the osmotic pre-treatment using the neural network model and to predict the convective drying process with the objective to foresee the best temperature to minimize the time of drying. With two hours of pre-treatment was enough to have the higher mass transfer rate between the slices and the solution. The osmotic pre-treatment contributed to the time reduction in the convective drying process and in the final appearance of the product. The increase in the osmotic solution temperature had a negative influence in the water reduction of the product and in the smallest solid gain during the pre-treatment. The neural network model was efficient in the prediction and optimization of the drying process with osmotic pre-treatment.

Key-words: yacon, osmotic pre-treatment, convective drying, neural network.

## 1 INTRODUÇÃO

A sociedade vem buscando alimentos com fins especiais e que ajudem de alguma forma na manutenção da saúde. O Brasil possui uma grande extensão territorial, diversidade de solos, clima e regiões geográficas o que o torna um dos maiores produtores de alimentos. O yacon é um tubérculo com propriedades especiais por causa dos carboidratos de reserva que o compõem, as cadeias de frutooligossacarídeos. Estas possuem funções prebióticas que ajudam na manutenção da flora intestinal, ajudam a reduzir o colesterol no sangue, previne o câncer de intestino entre outros (NITSCHKE & UMBELINO, 2002). A água é o maior componente no tubérculo, por volta de 90%, o que o torna susceptível a uma rápida degradação e a uma vida útil, em condições ambientes, de aproximadamente 7 (sete) dias.

O yacon desidratado possui um alto valor agregado no comércio internacional, como no Chile e Alemanha, que comercializam as fatias desidratadas a U\$ 18.4/100 gramas, Figura 1.1.

FIGURA 1.1 – YACON DESIDRATADA COMERCIALIZADA PELO CHILE A U\$ 18.4 / 100 GRAMAS



FONTE: PHARMA (2002-04)

A secagem de alimentos é uma tecnologia antiga que vêm sendo constantemente estudada e aperfeiçoada para obtenção de produtos com maior qualidade em menor tempo de processamento. A desidratação osmótica é uma nova tecnologia utilizada como pré-tratamento a outros processos como a liofilização, secagem à vácuo, secagem convectiva entre outras. Ela vem sendo



muito pesquisada por causa da conservação dos atributos sensoriais dos alimentos, como cor, sabor e textura. Uma das grandes vantagens é a retirada de água do produto sem que ocorra sua mudança de fase, o que economiza energia e na secagem convectiva, menores teores de umidade são alcançadas em menor tempo.

A predição de comportamento de processos tecnológicos por redes neurais tem mostrado excelentes coeficientes de correlação em comparação aos modelos matemáticos fenomenológicos. As redes neurais realizam o processamento numérico em paralelo o que aumenta o número de cálculos pelo tempo. A sua aplicação na tecnologia de alimentos vem se tornando freqüente como se pode verificar pelo número crescente de publicações na área. Este trabalho de dissertação teve o objetivo principal de estudar o processo de secagem convectiva do tubérculo de yacon, com e sem pré-tratamento osmótico, e otimizar algumas características do pré-tratamento osmótico e da secagem convectiva empregando redes neurais. Portanto os objetivos específicos são:

- estabelecer o tempo do pré-tratamento osmótico tendo como dependência a espessura das fatias, concentração e temperatura da solução osmótica;
- determinar o processo de secagem da yacon com e sem pré-tratamento osmótico;
- prever e otimizar o pré-tratamento osmótico a partir da influência da espessura das fatias, concentração e temperatura da solução osmótica na redução de peso e ganho de sólidos pelo modelo de redes neurais;
- treinar uma rede neuronal para a secagem convectiva com o objetivo de prever a melhor temperatura necessária para minimizar o tempo de secagem.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O objetivo deste capítulo é proporcionar um estudo mais aprofundado dos assuntos abordados na introdução. Foram revisados nas publicações os princípios dos métodos, os recentes estudos realizados e o apoio necessário para a discussão dos resultados obtidos sobre o yacon, pré-tratamento osmótico, secagem convectiva e redes neuronais.

### 2.1 YACON

#### 2.1.1 Aspectos gerais

O tubérculo de yacon pertence à família das *Compositae*. Ele é cientificamente conhecido como *Polymnia sonchifolia* Poeppig & Endlicher ou *Smallanthus sonchifolia* Poeppig & Endlicher H. Robinson (GRAEFE et al., 2003). Sendo originário dos Andes, desenvolve-se desde a Colômbia e Venezuela até o noroeste da Argentina, climas tropical e subtropical em altitudes que atingem 2000 metros (HERMANN, 1997-98).

O nome yacon possui origem da língua indígena Quéchua, que significa; yakku= insípido e unu = água, e apresenta nomes populares em diferentes países, como na Inglaterra (leafcup, yacón), Espanha (yacon, yacuma, jícama), Peru e Bolívia (aricoma), Colômbia (arboloco, jiquima e jiquimilla), Venezuela (jiquima e jiquimilla), Argentina (llacon), França (poir de terre), Estados Unidos (yacon strawberry), Itália (polimnia) (ZARDINI, 1991).

Pertence a uma família extensa de plantas com numerosos representantes comuns, como o girassol, a dália e o dente de leão. O yacon apresenta flores grandes distribuídas ao longo de talos pouco ramificados (GRAU et al., 2001; GRAU & REA, 1997). Na fase de crescimento, aproveitam-se as folhas e o caule para fazer chá.

A maior parte do yacon é cultivado nos Andes, em parcelas ou lotes familiares para o próprio consumo ou em parcelas comerciais que não ultrapassam

um hectare de cultivo (GRAU, et al., 2001). Nas últimas três décadas o cultivo de yacon tem se estendido para outros continentes. Em muitos estados dos EUA há o cultivo do yacon, sem significância comercial (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1989). Na Nova Zelândia o yacon foi introduzido nos supermercados e de lá para o Japão. Algumas mudas foram distribuídas do Japão a Coréia e ao Brasil. No início dos anos 90 o tubérculo foi introduzido no Brasil sendo cultivado a nível comercial no estado de São Paulo (MEDEIROS, 2001; GRAU, 1997).

### **2.1.3 Características botânicas**

O yacon tem a origem do gênero como *Polymnia* (Compositae, Heliantheae, subespécie Melampodinae) que foi descoberto em 1751. Este tubérculo tem sido referido até recentemente como *Polymnia sonchifolia* Poeppig. & Endlicher.

A planta apresenta eixo aéreo, com folhas e gemas vegetativas e florais, e um sistema subterrâneo constituído por um eixo caulinar subterrâneo de onde partem raízes delgadas, raízes tuberosas e gemas caulinares protegidas por catafilos e com numerosos primórdios de raízes Figura 2.1. (MACHADO et al., 2000). Quando as flores começam a desabrochar, em cerca de oito meses, inicia-se a colheita das batatas. O plantio é feito em qualquer época do ano. A planta é rústica e resiste bem à seca. O solo deve estar sempre fofo, evitando-se formar leiras muito altas, o que prejudica o crescimento lateral das raízes. (MEDEIROS, 2001).

Esta planta é um arbusto com até 3 metros de altura. A sua parte subterrânea é composta de 4 a 20 tubérculos que podem medir de 10 a 25 cm de diâmetro. O crescimento dos tubérculos se dá pela proliferação do tecido do parênquima no córtex do tubérculo e particularmente no cilindro vascular. O parênquima acumula açúcares e alguns tipos de pigmentos. De acordo com os pigmentos a cor dos tubérculos varia desde branco, creme, branco com estrias de coloração roxa, rosa e amarela.

FIGURA 2.1 - FLOR DO YACON E GEMAS CAULINARES



O yacon possui grande capacidade de adaptação em diferentes regiões climáticas, cresce rapidamente e sobrevive mesmo em solos pobres. É uma planta perene, suas raízes tuberosas são subterrâneas e pesam de 200 a 500 g ou mais, chegando a produzir acima de 5 Kg tubérculo/planta (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1989). Seu rendimento no campo pode variar entre 50 a 70 t/ha (ESPIRITO SANTO et al., 2003; CAPITO, 2001).

#### **2.1.4 Composição química e valor alimentício**

A composição deste tubérculo apresenta variações com a região de plantio, a Tabela 2.1 é um exemplo típico de sua composição média onde HERMANN et al. (1997-98) determinaram a composição química do yacon de algumas regiões diferentes dos Andes latino-americanos.

OHYAMA et al. (1990) estudaram o conteúdo de carboidratos solúveis nos tubérculos de yacon de 96 dias após colheita, sob refrigeração, determinando o conteúdo total de 773 mg/g em base seca o equivalente em média a 9,93% do total do peso do yacon. A glicose e sacarose correspondem a 2,98% do peso total.

TABELA 2.1 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA MÉDIA DO YACON EM BASE ÚMIDA

COMPONENTES	COMPOSIÇÃO
Água (%)	88,64 - 91,2
Carboidratos (%)	8,9 – 12,7
Cinzas (%)	0,43 – 0,6
Proteínas (%)	0,27 – 0,37
Lipídios (%)	0,01 – 0,05
Fibras (%)	0,31 - 0,41
Sólidos Solúveis (°Brix)	9,0 -12,6
Açúcares Totais	18 – 42
Cálcio (mg /100g)	5,6 – 13,1
Fósforo (mg /100g)	18,2 – 30,9
Potássio (mg/100g)	183,4 – 295

Fonte: HERMANN et al. (1997-98)

Entre os minerais, o potássio é o macroelemento presente em maior quantidade, 1,34%, na matéria seca seguido pelo cálcio (0,14%), magnésio (0,12%), fósforo (0,08%) e sódio (0,06%). Dentre os microelementos, ferro e zinco destacam-se com 87 e 36 µg/g respectivamente (INFORME TECNICO, 95/96).

A maioria das raízes armazena carboidratos na forma de amido, já o yacon e várias plantas da família *Compositae* armazenam os carboidratos na forma de frutanos que são polímeros de frutose (CAPITO, 2001).

Os carboidratos que estão presentes nos tubérculos de yacon são a frutose, glicose, sacarose e frutooligossacarídeos (FOS) de baixa polimerização (3 a 10 frutooligossacarídeos) e traços de amido e inulina (ASAMI et al., 1989; OHYAMA et al., 1990). Os oligofrutanos são os carboidratos em maior quantidade nos tubérculos com teores que podem chegar a 67% do peso seco da planta (ASAMI et al., 1989). Os oligofrutanos purificados da yacon tem sido identificados como beta (2→11) frutooligossacarídeos com uma sacarose terminal. Segundo revisão sobre oligofrutanos realizada pôr NITSCHKE & UMBELINO (2002), esses tipos de oligofrutanos não são redutores e apresentam a vantagem de não serem susceptíveis à reação de Maillard. Quanto a estabilidade, estes açúcares são estáveis a valores de pH superiores a 3 e temperaturas de até 140 °C. Os oligofrutanos não são degradados na maioria dos processos térmicos das indústrias de alimentos.

Os oligofrutanos não são metabolizados no intestino delgado de mamíferos e aves, em geral. Passam para o intestino grosso, promovem o crescimento de

bactérias dos gêneros *Bifidobacterium* as quais, por competição, inibem o crescimento de bactérias putrefativas, como os clostrídios, e outras nocivas ao homem. Estas propriedades (efeito prebiótico) proporcionam a diminuição de produtos putrefativos nas fezes, regularização da função da defecação em indivíduos com constipação crônica, menor teor de colesterol sangüíneo, maior absorção de cálcio e magnésio, menor perda de tecido ósseo e menor incidência de câncer de cólon (NITSCHKE & UMBELINO, 2002; HERMANN, 1997-98).

O consumo dos tubérculos do yacon são tradicionalmente cru, *in natura*, ou depois de expostos ao sol por muitos dias, para aumentar a sua doçura. Como revisado por CAPITO (2001) & GRAEFE et al. (2003), os açúcares polimerizados tendem a se despolimerizar com o tempo pós-colheita. Por isso o interessante seria adaptar uma tecnologia pós-colheita destes tubérculos de forma a estabilizá-lo.

GRAEFE et al. (2003) estudou a variação do FOS em yacon pós-colheita e seca durante 6 dias ao sol. Ele verificou que para o consumo da yacon sem ser direcionada para fins dietéticos esta é uma tecnologia apropriada. Mas, para uma maior conservação dos FOS a estabilização ou desidratação da yacon deverá ser a mais rápida possível depois da colheita. Assim, pode-se agregar mais valor a yacon desidratada.

O proposto neste trabalho não é a caracterização dos açúcares da yacon. Mas, com base nas revisões podemos observar que uma tecnologia pós-colheita que estabilize as reações no tubérculo como a sua desidratação de forma rápida pode ajudar em uma melhor conservação dos FOS.

## 2.2 SECAGEM DE ALIMENTOS

A secagem é um processo na qual a água é removida para cessar ou diminuir o crescimento microbiano assim como diminuir as reações químicas dos alimentos. A Agência de Vigilância Sanitária, ANVISA, limita o teor de umidade em no máximo 25% (p/p) do alimento.

Os produtos resultantes da desidratação das frutas serão classificados como: secos e desidratados. A fruta seca é o produto obtido pela perda parcial da água da fruta madura inteira ou em pedaços, atingindo-se um teor de umidade final

que varia de 15% a 25%. As frutas desidratadas, de modo geral, são obtidas pela perda quase total de água da fruta inteira, em pedaços ou polpa, sendo o teor de umidade do produto final de, no máximo, 3% (TRAVAGLINI et al., 1999).

Segundo ROMERO et al. (1997), a secagem e desidratação de materiais alimentícios são usadas como técnica de preservação. Os microorganismos que provocam a decomposição dos alimentos não podem crescer e se multiplicar na ausência de água livre do alimento. Além disso, muitas das enzimas que causam as mudanças químicas nos alimentos, não podem reagir sem a presença de água livre.

As vantagens de se utilizar o processo de secagem são:

- Facilidade na conservação do produto;
- Estabilidade dos componentes aromáticos à temperatura ambiente por longos períodos de tempo;
- Proteção contra degradação enzimática e oxidativa;
- Redução de seu peso;
- Economia de energia – não necessita de refrigeração e disponibilidade do produto em qualquer época do ano.

## 2.3 DESIDRATAÇÃO OU PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO

A desidratação de frutas e vegetais é objeto de muita pesquisa na busca por métodos de secagem que proporcionem baixo custo e produtos com mínima alteração de suas características organolépticas e nutritivas. O método da desidratação osmótica consiste na remoção parcial da água pela diferença de pressão osmótica, quando se coloca o alimento em contato com uma solução hipertônica de solutos, tais como, sacarose, cloreto de sódio, açúcar invertido, lactose, maltodextrina, xarope de milho, sorbitol ou a combinação dos mesmos.

O pioneiro em pesquisar o pré-tratamento osmótico foi Ponting (PONTING et al., 1966) sendo que desde então, estão sendo publicados trabalhos relacionados (RAOULT-WACK, 1994; RAOULT-WACK et al., 1992; TORREGGIANI, 1993), onde são estudados os mecanismos do pré-tratamento, principais variáveis de operação,

modelagem matemática do ganho de sólidos e da retirada de água, combinação com outros processos: a vácuo, alta pressão hidrostática, aplicação de pulsos elétricos na solução, aplicação de força centrífuga, ultra-som e outros. Portanto um dos grandes desafios da desidratação osmótica é aumentar a taxa de transferência de massa do alimento a ser processado (RASTOGI et al., 2002).

Pelos grandes benefícios que o pré-tratamento osmótico agrega ao alimento desidratado, nos últimos anos estão sendo publicados diversos artigos sobre este assunto. Devido as constantes pesquisas em desidratação osmóticas com frutas e vegetais foi fundada uma comissão europeia intitulada "*Improvement of Food Quality by Application of Osmotic Treatments in Conventional and New Processes*" sendo formada por um grupo de 13 países europeus (RASTOGI et al., 2002).

As principais aplicações do pré-tratamento osmótico são em doces com impregnação do soluto, frutas e vegetais desidratados. As indústrias asiáticas como da Índia e a Tailândia produzem em pequena escala mamão papaya desidratado conhecido popularmente como *Tooti-fruiti*. Outros doces desidratados por impregnação também são produzidos com a finalidade de aplicar-se em barras de cereais, sorvetes e outros. Um produto bastante conhecido é a bala de gengibre (RASTOGI, 2002). A Itália é um dos únicos países onde são fabricados equipamentos para o pré-tratamento osmótico.

Tendo em vista as grandes vantagens do pré-tratamento osmótico, muitos estão estudando a viabilidade de uma escala industrial, sendo que alguns problemas precisam ser resolvidos como o caso da reconcentração da solução osmótica, que é motivo de patentes do processo (FRAGOSO & PAZ, 2002). Outro problema a ser enfrentado é a diferença de densidade entre alimento e solução fazendo com que esse não fique totalmente em imersão.

### **2.3.1 Princípio do método**

O processo de desidratação osmótica, também conhecida como desidratação-impregnação (DII) baseia-se na imersão de alimentos, inteiro ou fatiado, em soluções hipertônicas (açúcares, cloreto de sódio, sorbitol, glicerol), originando dois fluxos simultâneos opostos: uma saída da água do produto para a



solução e uma migração de solutos da solução para o produto. Um terceiro fluxo, também envolvido consiste na perda de alguns sólidos naturais, como açúcares, minerais, entre outros nutrientes que, embora sejam insignificantes proporcionalmente aos dois fluxos principais, podem ser importantes para as qualidades organolépticas (aroma, cor, textura) e nutricionais (minerais e vitaminas) do produto (RAOULT – WACK, 1994).

RASTOGI et al. (2002) em recentes pesquisas propuseram uma explicação para o mecanismo de retirada de água no pré-tratamento osmótico para alimentos. Eles verificaram que depois dos estágios iniciais do processo de pré-tratamento osmótico a estrutura física do material começava a mudar, aumentando a pressão osmótica e alcançando um valor crítico que gera a desintegração e o encolhimento das células do tecido, facilitando a retirada de água. Para aumentar a difusão da água do centro do alimento seria mais difícil, pois, a pressão osmótica necessária para o rompimento das células centrais não é alcançada.

Segundo RASTOGI, et al. (2002) & LERICI, et al. (1985), as principais variáveis no pré-tratamento que influenciam no processo de transferência de massa e na qualidade do produto são:

- temperatura da solução;
- natureza e peso molecular do soluto;
- concentração da solução;
- forma do alimento;
- estrutura do tecido;
- agitação;
- proporção entre solução e alimento;
- aditivos.

A tendência de usar a desidratação osmótica como um tratamento preliminar, geralmente ocorre devido ao desejo de melhorar a qualidade do alimento seco e não a uma intensa retirada de água. Este pré-tratamento tem um efeito protetor na estrutura do material seco. Praticamente a fruta ou vegetal que sofre desidratação osmótica combinada com secagem convectiva é caracterizada por ter uma estrutura flexível e macia, além de ocorrer uma diminuição do encolhimento na secagem. Além da melhoria da qualidade, destaca-se a economia de energia já que

não ocorre mudança de fase da água. O produto é processado em fase líquida, geralmente fornecendo bons coeficientes de transferência de calor e massa (RAOULT-WACK, 1994; TORREGGIANI, 1993).

### **2.3.2 Variáveis do processo**

#### **2.3.2.1 Agentes desidratantes**

A escolha do tipo e concentração da substância desidratante é uma questão complexa. As mudanças nos valores nutritivos e nas propriedades organolépticas do produto final, com respeito ao custo do processo são os indicadores básicos para a avaliação da utilização de cada substância osmótica (LENART, 1996).

O soluto pode ser empregado como agente de desumidificação e/ou impregnação. A impregnação é favorecida por solutos de baixo peso molecular e a desumidificação por solutos de alto peso molecular. Sacarose ou cloreto de sódio são muito utilizados como agentes desidratantes, mas qualquer soluto ou solvente muito solúvel que seja miscível com água pode ser usado, como o glicerol, sorbitol, entre outros (RAOULT-WACK, 1994).

A solução osmótica deve possuir uma baixa atividade de água e os solutos devem ser inofensivos à qualidade do produto e ter palatável (LERICI et al., 1985).

A sacarose é o mais comum agente desidratante de frutas por resultar em produtos com boa aceitação no sabor, textura e cor, pois funciona como uma boa barreira ao oxigênio. NSONZI & RAMASWAMY (1998) estudaram a desidratação osmótica de *blueberries* com pré-tratamento antes da secagem convectiva. Eles avaliaram parâmetros de qualidade como cor, textura e rehidratabilidade, verificando que as condições osmóticas ótimas foram 50°C e 55°Brix de sacarose durante 4,5 horas de secagem convectiva.

Outros agentes apresentam um bom potencial desidratante. O sorbitol utilizado para a desidratação de frutas tem se mostrado eficiente na retirada de água e na aceitabilidade sensorial do produto (ERBA et al, 1994; BOLIN & HUXSOLL, 1983). TREGUNNO & GOFF (1996) observaram melhores resultados nas

características físicas da maçã como a cor e rehidratabilidade e na retirada de água utilizando como agente osmótico o sorbitol (50% concentração) e a sacarose (52% concentração) quando comparados com o xarope de milho.

CHUA et al. (2003), relataram que a retirada de água e o ganho de sólido do alimento é influenciada pela estrutura do material biológico e do peso molecular do agente desidratante quando comparou o pré-tratamento osmótico de batata e de cenoura com o agente desidratante cloreto de sódio e banana com o agente desidratante sacarose.

VENTURA et al. (2003) otimizaram o processo de desidratação osmótica de yacon visando uma máxima perda de umidade e mínima incorporação de sólidos. Foram estudadas as faixas de concentração da solução de sorbitol entre 53 e 73°Brix, temperatura 30 e 45°C e tempo variando entre 60 e 180 minutos. Nas condições otimizadas de temperatura na faixa de 30 a 33°C, concentração da solução 63 a 69°Brix e tempo de 84 a 120 minutos, determinadas a partir da Metodologia de Superfície de Resposta, foram obtidas perdas de umidade da ordem de 53 a 55% e de incorporação de sólidos de 6,02 a 6,46%.

FALCONE (1988), estudou a influência das faixas de temperatura de 50, 60, 70 e 80°C e das concentrações da solução de sacarose de 50, 60, 65 e 70 °Brix, na desidratação osmótica do abacaxi, obtendo uma redução no peso de 70% e maior velocidade de desidratação, em 4 horas, com a concentração da solução de 70 °Brix e a temperatura de 70 °C.

#### 2.3.2.2 Temperatura

Um importante parâmetro com influência decisiva na desidratação é a temperatura do processo (LENART, 1996). A taxa da transferência de massa aumenta consideravelmente com o aumento da temperatura, porém o escurecimento não enzimático, o amolecimento da parede vegetal e a deterioração de sabor, que se iniciam a partir de 50 °C limitam o processo. Entretanto, deve-se considerar as características próprias de cada alimento para se considerar a temperatura máxima do pré-tratamento (LENART, 1996; TORREGGIANI, 1993; PONTING et al., 1966).

Na desidratação osmótica de morango, observou-se que à alta temperatura, 50°C, a perda de água e o ganho de sólidos foram maiores que a baixa temperatura (YANG et al., 1992).

VIAL et al. (1991) estudando a desidratação osmótica do kiwi constataram que em altas temperaturas e alta concentração da solução, obtém-se alta taxa de transferência de água. FALCONE et al. (1988) observam um aumento da velocidade do processo osmótico utilizando-se temperaturas crescentes.

LAZARIDES et al. (1995), estudaram a cinética da transferência de massa na maçã visando à mínima entrada de sólidos no produto com a avaliação da temperatura (20 a 50°C), concentração da solução de sacarose (45-68%) e o efeito do tamanho da molécula do soluto, utilizando também o xarope de milho com diferentes graus de polimerização. Foi constatado que o aumento da temperatura e da concentração da solução aumentaram as taxas de retirada de água e de ganho de sólidos, sendo o aumento da concentração a maior responsável pelo aumento do conteúdo de sólidos totais na maçã. O aumento no tamanho, ou peso molecular do soluto desfavoreceu proporcionalmente o aumento das taxas de transferência de massa.

#### 2.3.2.3 Tempo de imersão

A transferência de massa ocorre de maneira mais intensa nas duas primeiras horas para a perda de água, e nos trinta primeiros minutos para o ganho de sólidos. Após este período, o processo de transferência de massa torna-se cada vez mais lento. Para um processo muito longo, a uma temperatura baixa, haverá um maior ganho de sólidos (RAOULT-WACK, et al., 1992).

Segundo LENART (1996), o processo de desidratação deve ser conduzido em um curto espaço de tempo a fim de se alcançar um alto grau de desidratação com um ganho de sólido relativamente pequeno.

Na desidratação de maçãs a maior taxa de perda de peso ocorreu nos primeiros estágios do experimento sendo que no final de 6 horas, a taxa de redução de peso diminuiu (CONTRERAS et al., 1981). ERTEKIN et al. (1996), observaram,

na desidratação de ervilhas, um incremento no ganho de sólidos e a maior de perda de peso nas primeiras 2 horas.

VIDEV et al. (1990), desidratando osmoticamente vagens em solução com 17% de cloreto de sódio a 40 °C, constataram que a taxa de remoção de água e a incorporação de sal foram máximas no início do processo, decrescendo gradualmente com o tempo de contato.

KOWALSKA & LENART (2001), verificaram a transferência de massa sob condições de pré-tratamento de 30°C, 61,5% de sacarose variando o tempo de 0 a 180 minutos, com três alimentos, maçã, abóbora e cenoura. Eles constataram que a transferência de massa depende da estrutura do alimento. A taxa de retirada de água e de ganho de sólidos foi em geral maior nos primeiros 10 minutos do processo, sendo ainda a taxa de retirada de água de 5 a 10 vezes maior que a de ganho de sólidos.

#### 2.3.2.4 Agitação

A agitação é um dos fatores que desempenham um papel bastante importante no processo de desidratação tornando-o mais rápido. Porém, deve-se fazer o controle para que não haja danos ao produto, além de se considerar os custos relacionados com equipamentos, energia, entre outros (PONTING et al., 1966).

### 2.4 SECAGEM CONVECTIVA

Os métodos de secagem acabaram sendo aprimorados pelos turcos, que tratavam uvas e ameixas com solução de soda cáustica diluída, fazendo com que suas cascas ficassem mais finas, permitindo uma rápida evaporação da água. Com isso, melhorava-se a consistência da fruta seca, evitando cortá-la a fim de se adiantar o processo de secagem natural ao sol, tornando-o mais rápido e econômico. Entretanto havia um problema sério resultante da aplicação deste

método: a contaminação pela exposição a que estava submetida à fruta (VON LOESECKE, 1943).

#### **2.4.1 Períodos da secagem convectiva**

As características específicas de cada produto, associadas às propriedades do ar de secagem e ao meio de transferência de calor adotado, determinam diversas condições de secagem. Entretanto, a transferência de calor e de massa entre o ar de secagem e o produto é fenômeno comum a qualquer condição de secagem. O processo de secagem, baseado na transferência de calor e de massa, pode ser dividido em três períodos (SHARMA, 2000).

O primeiro período representa o início da secagem. Nesse período ocorre uma elevação gradual da temperatura do produto e da pressão de vapor de água. Essas elevações prosseguem até o ponto em que a transferência de calor seja equivalente à transferência de massa (água).

O segundo período caracteriza-se pela taxa constante de secagem. A água evaporada é a água livre. A transferência de massa e de calor é equivalente e, portanto, a velocidade de secagem é constante. Enquanto houver quantidade de água na superfície do produto suficiente para acompanhar a evaporação, a taxa de secagem será constante.

No terceiro período, a taxa de secagem é decrescente. A quantidade de água presente na superfície do produto é menor, reduzindo-se, portanto, a transferência de massa. A transferência de calor não é compensada pela transferência de massa, o fator limitante nessa fase é a redução da migração de umidade do interior para a superfície do produto. A temperatura do produto aumenta, atingindo a temperatura do ar de secagem. Quando o produto atinge o ponto de umidade de equilíbrio em relação ao ar de secagem, o processo é encerrado.

### 2.4.2 Cinética de secagem

Os fatores que governam a velocidade dos mecanismos de transferência a pouco descritos determinam a taxa de secagem. Estes fatores são: pressão de vapor d'água no material e no ar de secagem, temperatura e velocidade do ar, velocidade de difusão da água no material, espessura e superfície exposta para secagem (VAN ARSDEL, 1973).

PARK et al. (2001), estudaram através do uso de um secador convectivo vertical de bandejas, as curvas de secagem da pêra bartlett nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C em três velocidades do ar 0,5, 1,0 e 1,5 m/s. Eles observaram que os valores de difusividade aumentaram com o aumento da temperatura do ar, mostrando a diminuição da resistência interna do alimento. Eles verificaram que o aumento na velocidade do ar aumenta a difusividade e que este aumento foi mais pronunciado quando a temperatura do ar foi maior.

EL-AOUAR (2001), observou a influência da velocidade do ar de secagem (1,25, 2,25 e 3,25 m/s) para duas temperaturas (40 e 60°C) na secagem de cubos de mamão formosa e percebeu nas curvas de cinética que a temperatura exerceu maior influência sobre o processo de transferência de massa. A combinação alta velocidade e alta temperatura proporcionaram menor tempo de secagem.

FIOREZE & MORINI (2000), estudaram a secagem de inhame na forma de rodela de 1 e 2,5 cm de espessura e em filetes com 1x1x5 cm com o ar de secagem variando de 35 a 70°C de temperatura e com velocidade constante de 2,43 m<sup>3</sup>/min. Eles verificaram a influência do formato do alimento na qualidade do produto e no gasto energético, onde verificaram que a forma de filetes foi melhor por causa da maior área de contato com o ar e a menor distância para a difusão da água do centro para a superfície do alimento. A temperatura do ar em 50°C mostrou ser mais viável.

TOGRUL & PEHLIVAN (2003), investigaram o comportamento de damascos durante a secagem convectiva, variando a velocidade (0,2, 0,5, 1,0 e 1,5 m/s) e a temperatura (50, 60, 70 e 80 °C) do ar de secagem. A taxa de secagem decresceu continuamente com o tempo, sem período constante, mostrando que o único mecanismo físico que domina a secagem do damasco é a difusão. A variação da

temperatura no interior do damasco também foi medida em função da velocidade do ar de secagem e da temperatura do ar, onde a temperatura teve maior influência.

Dependendo da matéria-prima a ser seca a velocidade do ar de secagem exerce pouca influência. A temperatura do ar de secagem é a principal variável independente na determinação do tempo de secagem.

### **2.4.3 Secagem osmo-convectiva**

A preocupação com a qualidade dos produtos secos tem crescido devido ao mercado consumidor estar cada vez mais exigente. Do ponto de vista dos consumidores, a qualidade dos produtos secos essencialmente depende dos aspectos nutricionais, sendo a cor o critério mais importante numa apreciação global do produto (ALVES & SILVEIRA, 2002).

A secagem osmo-convectiva que representa a secagem convectiva com pré-tratamento osmótico vem sendo realizada por diversos autores (CHUA et al, 2003; ALVES & SILVEIRA, 2002; NSONZI & RAMASWAMY, 1998) no intuito de preservar características sensoriais dos alimentos a serem desidratados. A desidratação osmótica é utilizada como pré-tratamento de muitos outros processos, com o objetivo de melhorar as condições nutricionais, sensoriais e funcionais dos alimentos (TORREGGIANI, 1993). Os principais processos utilizados são a secagem por congelamento, secagem a vácuo e convectiva. O pré-tratamento osmótico com a secagem convectiva acoplada a uma fonte de energia radiante também está sendo estudada por CHUA et al. (2003), com o objetivo de melhorar a cinética de secagem e as mudanças na cor do alimento.

A secagem osmo-convectiva de tomates foi estudada por ALVES & SILVEIRA (2002) com o objetivo de obter um produto com maior vida de prateleira. Para isso foram testados a sacarose e o cloreto de sódio como agente osmótico desidratante. A agitação e a temperatura no pré-tratamento foram variadas. Logo após o pré-tratamento foi testada a influência de um secador de bandejas e uma estufa a vácuo. O primeiro trabalhou em temperaturas de 45, 55 e 65°C e velocidade do ar de 1,5, 2,0 e 2,5 m/s e o segundo, com pressão de vácuo 5, 16 e 25 inHg. Comparou-se a eficiência de pré-tratamento osmótico com o tomate seco sem pré-



tratamento osmótico. Os autores concluíram que a taxa de desidratação osmótica é influenciada pela concentração da solução osmótica e a temperatura do processo. A agitação em diferentes velocidades não apresentou diferença significativa na retirada de água. A temperatura do processo de secagem exerceu maior influência na cinética de secagem do que a velocidade e pressão de vácuo. As amostras desidratadas osmoticamente secaram em menor tempo de secagem do que as amostras não desidratadas.

## 2.5 REDES NEURONAIS

Os trabalhos com redes neuronais tiveram início devido à percepção de alguns pesquisadores de que o cérebro humano processa as informações de uma forma inteiramente diferente do computador digital convencional. Um computador geralmente consiste em um único processador operando, executando instruções, escritas por um programador, uma de cada vez em seqüência, tarefas de maior complexidade podem levar dias para serem executadas.

As redes neuronais são estruturas matemáticas baseadas no funcionamento do cérebro humano, numa tentativa de imitar a inteligência Figura 2.2. A rede é formada por unidades básicas, os neurônios, arranjados e interligados de forma semelhante a um tecido do cérebro, a estrutura neuronal procura copiar a forma de ligação de um neurônio com outro no cérebro.

O sistema nervoso humano é altamente complexo. Consistem em bilhões de células nervosas, neurônios, intensamente conectadas entre si. Ele realiza tarefas rotineiras de reconhecimento perceptivo em aproximadamente 100-200 milissegundos (ms) como, por exemplo, o reconhecimento de pessoas. Esta capacidade do cérebro é devido a uma grande estrutura e habilidade de desenvolver suas próprias regras através do que usualmente denominamos experiências.

FIGURA 2.2 – REPRESENTAÇÃO DE UMA CÉLULA NERVOSA

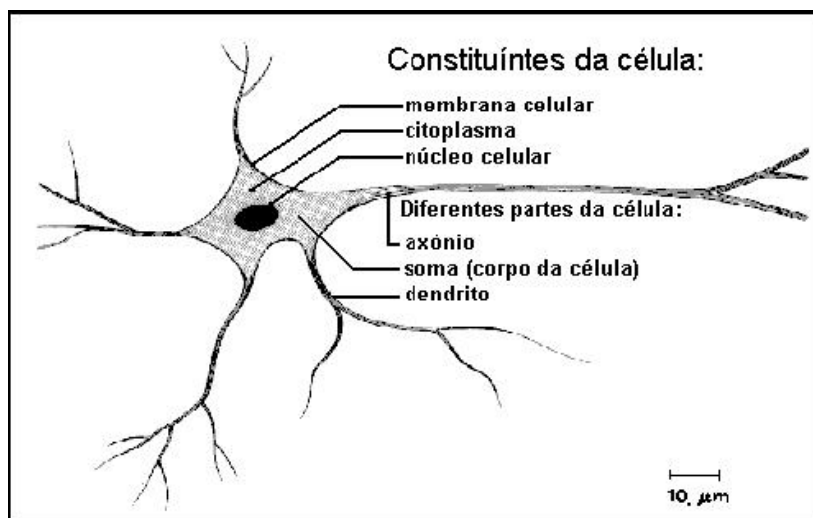


TABELA 2.2 - COMPARAÇÃO ENTRE COMPUTADORES E NEUROCOMPUTADORES

COMPUTADORES	NEUROCOMPUTADORES
Executa programas	Aprende
Executa operações lógicas	Executa operações não lógicas, transformações, comparações
Depende do modelo ou do programador	Descobre as relações ou regras dos dados e exemplos
Testa uma hipótese por vez	Testa as possibilidades em paralelo

FONTE: TATIBANA & KAETSU (2004)

HAYKIN (2001) definiu uma rede neuronal como um processador paralelamente distribuído, maciçamente, constituído de unidades de processamento simples, que têm a propensão natural para armazenar conhecimento experimental e torná-lo disponível para o uso. Ela se assemelha ao cérebro em dois aspectos:

1. O conhecimento é adquirido pela rede a partir de seu ambiente através de um processo de aprendizagem.
2. Forças de conexão entre neurônios, conhecidas como pesos sinápticos, são utilizadas para armazenar o conhecimento adquirido.

O procedimento utilizado para realizar o processo de aprendizagem é chamado de algoritmo de aprendizagem, cuja função é modificar os pesos sinápticos da rede de uma forma ordenada para alcançar um objetivo do projeto desejado.

As redes neuronais são estruturas matemáticas que estimam relações entrada-saída de um sistema. São, portanto, mais uma ferramenta a ser utilizada na

modelagem de processos. Sua característica mais interessante é que não dependem de um modelo matemático fenomenológico que relaciona a entrada do processo com a saída. Elas aprendem essa relação a partir de um processo de treinamento semelhante ao aprendizado de um cérebro humano (GONTARSKI, 2000). YAMAMOTO (1998), simulou o processo industrial de síntese de amônia através de um modelo fenomenológico e empregando redes neurais, obtendo resultados confiáveis e com velocidade muito superior ao modelo fenomenológico.

A estrutura de distribuição da rede neural possui características paralelas e não lineares.

As redes neurais utilizam os modelos matemáticos empíricos como ferramenta para o ajuste de curvas. Mas existem algumas diferenças entre as redes neurais e os típicos modelos empíricos. Segundo BAUGHMAN & Liu, 1995, elas apresentam melhor capacidade de predição por conterem uma arquitetura paralela onde cada neurônio atua como um processador independente dos outros, e os modelos empíricos dependem das variáveis independentes. O modelo neuronal é mais adaptativo do que os modelos empíricos, eles apresentam algoritmos de treinamento específicos, onde o fator peso é ajustado entre neurônios até que o valor do modelo de entrada e saída seja obtido. Se as condições de entrada e saída mudarem o modelo tende se adaptar novamente. A multiplicidade de variáveis dependentes e independentes com que pode ser modelada uma rede neuronal é uma vantagem sobre os modelos empíricos.

A aplicação do modelo neuronal na tecnologia e engenharia de alimentos tem mostrado melhores resultados na predição e modelagem de processos do que os modelos convencionais de regressão (NI & GUNASKARAN, 1998; XIE & XIONG, 1999; CHEN et al., 2001).

### **2.5.1 Histórico**

- 1943 McCulloch e Pitts

Descreveram o primeiro modelo de cálculo lógico de uma rede neuronal. McCulloch foi um psiquiatra e neuroanatomista por treinamento, onde passou cerca de 20 anos refletindo sobre a representação de um evento no sistema nervoso. Pitts

foi um prodígio matemático que se associou a McCulloch em 1942. O modelo publicado em 1943 ajudou pesquisadores que desenvolverem trabalhos na área da inteligência artificial e cibernética (HAYKIN, 2001). A partir daí o desenvolvimento da medicina, da matemática, da física e computação contribuíram bastante para que a formulação das redes se desenvolvesse.

- 1958 Roseblatt

Publicou um trabalho no qual apresenta uma unidade de reconhecimento padrão, perceptron que é a base para um neurônio.

- 1969 Minsky e Pappert

Publicações sobre as limitações dos perceptrons isolados. Então, na década de 70 foi um período de pouco desenvolvimento nesta área onde órgãos de pesquisas se desencorajaram a investir em financiamentos onde associado a isto havia o alto custo da computação para aquela época.

- 1986 Rumelhart e McClelland

Publicação do livro de 2 volumes “Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructures of Cognition”. A partir desta data o estudo de redes disseminou pelo mundo inteiro (YAMAMOTO, 1998).

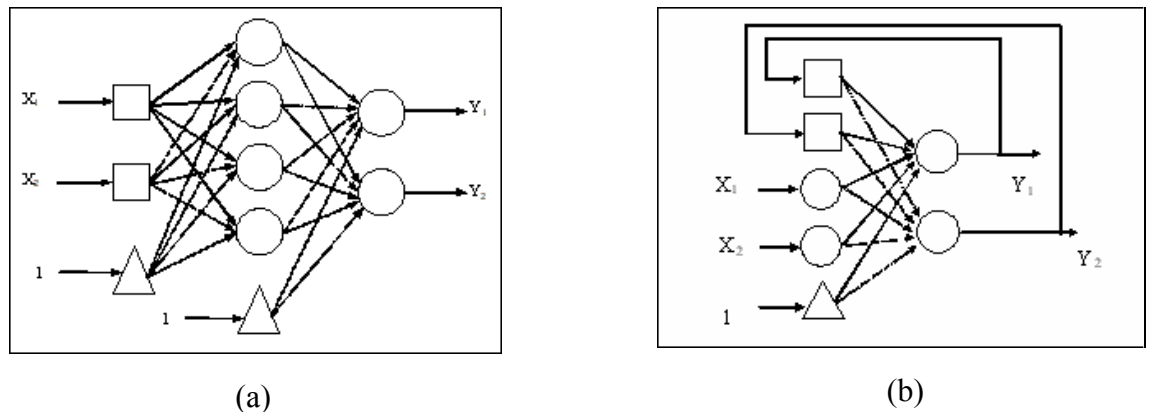
### **2.5.2 Classificação das redes neuronais**

As duas classes de redes que são comumente empregadas em processos tecnológicos são: a rede de múltiplas camadas, cujas informações seguem uma única direção, chamada *Feedforward*, e as redes recorrentes ou *Feedback*, são realimentadas com os valores de saída. Redes *Feedforward* possuem características de modelarem bem os processos estacionários possuindo boa estabilidade e relativa simplicidade enquanto que redes recorrentes são melhores para modelar processos dinâmicos (GONTARSKI, 2000; YAMAMOTO, 1998). Na Figura 2.3 duas arquiteturas de redes são demonstradas.

A forma como as redes são treinadas também é uma característica usada em sua classificação. O método mais comum para treinar uma rede é alimentá-lo com dados de entrada e com os dados de saída desejados. Os primeiros resultados são produzidos pela rede e comparados com os resultados desejados gerando os

erros. Estes são usados para ajustar os pesos na rede de forma que a próxima vez que o mesmo dado for usado, a rede se aproximará da resposta desejada. Esta forma de treinamento é chamada de supervisionada.

FIGURA 2.3 - ARQUITETURA DE UMA REDE NEURONAL DO TIPO (a) *FEEDFORWARD* E (b) RECORRENTE



Em algumas redes do caso inverso, não se fornece o resultado desejado, mas a ela é permitido organizar os dados numa forma que ela entenda estarem ajustados. Redes deste tipo são chamadas de não supervisionadas, ou ainda de auto organizadas. Algumas redes têm uma fase inicial auto organizada seguida de uma fase supervisionada.

### 2.5.3 Estrutura básica

Redes neurais são constituídas por neurônios que são unidades de processamento de informações fundamental para a operação das redes. Os neurônios são arranjados em camadas, e aqueles de uma camada podem estar conectados a muitos outros em diversas camadas. A Figura 2.2 mostra o modelo de um neurônio de uma rede neuronal *Feedforward*.

Os neurônios de uma camada são conectados a todos os neurônios da camada seguinte. Cada informação  $X$  que sai de um neurônio de uma camada (i) é ponderada por dado peso ( $W_{ij}$ ) e enviada a todos os neurônios da camada seguinte

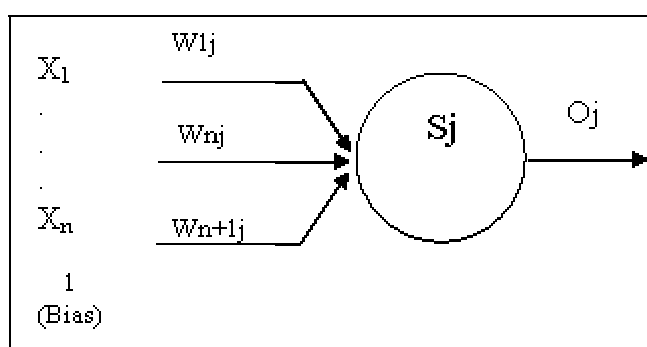
(j). O somador ou função aditiva, Equação 2.1, tem a função de somar os sinais de entrada, ponderados pelas respectivas sinapses dos neurônios.

A camada de entrada não efetua nenhum processamento. A fim de diminuir as dificuldades de convergência, todos os dados do conjunto de aprendizagem são normalizados, em geral entre  $[0,2; 0,8]$  ou  $[0,3; 0,7]$ . Além dos dados de entrada, alimentamos também um valor de referência (“bias”) à rede. O bias tem o efeito de aumentar ou diminuir a entrada líquida da função de ativação, dependendo se ele é positivo ou negativo, para que caiam dentro da região que possa ser usada pela função de transferência para melhor performance geral da rede.

O número de neurônios na camada oculta está intimamente ligado ao número de parâmetros ajustáveis da rede. Uma rede neuronal com poucos neurônios na sua camada oculta possui poucos parâmetros ajustáveis, e pode não ser suficiente para representar o sistema em estudo. Por outro lado, com o aumento indiscriminado do número de neurônios, os parâmetros existentes acabam representando muito bem a relação entre as variáveis de entrada e saída, porém a rede perde sua capacidade extrapolativa ou de generalização.

A convergência da rede neural está ligada à melhor escolha possível do conjunto de pesos  $W$ . As variáveis cuja influência é pequena para uma dada propriedade, seu peso será próximo de zero.

FIGURA 2.4 – MODELO NÃO LINEAR DE UM NEURÔNIO



A Figura 2.4 apresenta um neurônio de uma camada  $j$  da estrutura da rede. Todas as variáveis de entrada  $X_i$  são ponderadas com um valor  $W_{i,j}$  e somadas, conforme a Equação 2.1:

$$S_j = \sum_{i=1}^N w_{ij} \cdot x_i + w_{N+1j} \quad (2.1)$$

com,  $j = 1, 2, \dots, M$

onde:

$N$  = número de variáveis de entrada;

$M$  = número de neurônios da camada oculta.

A saída do neurônio,  $O_j$ , é então calculada à partir da expressão, Equação 2.2:

$$O_j = f(S_j) \quad (2.2)$$

A relação entre a entrada e saída dos neurônios é dada por uma função de ativação, Figura 2.5, do neurônio, que em geral pode ser sigmóide dada por:

$$\log \text{sig}(n) = \frac{1}{[1 + \exp(-n)]} \quad (2.3)$$

Outras funções de transferência que também podem ser utilizadas:

$$\tan \text{sig}(n) = \frac{2}{[1 + e(-2n)] - 1} \quad (2.4)$$

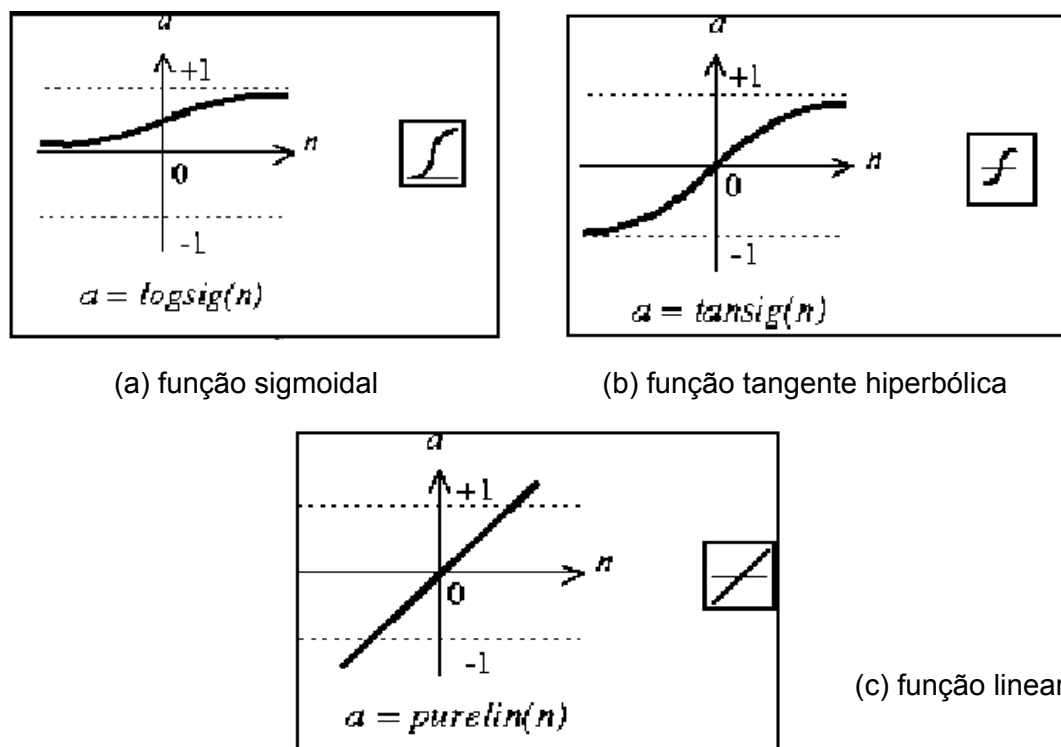
$$\text{purelin}(n) = n \quad (2.5)$$

$$\tanh(n) = \frac{2}{[1 + e(-n)] - 1} \quad (2.6)$$

O treinamento supervisionado é o processo no qual a rede utiliza os dados de entrada e saída (resposta) para ajustar seus parâmetros, de forma a encontrar uma correlação entre eles. O principal parâmetro da rede são os pesos sinápticos. Para se obter um conjunto de pesos ( $W$ ) deve-se possuir um conjunto de entrada e saída de dados do processo, variável independente e dependente ou resposta, respectivamente. O procedimento de ajuste dos pesos é feito de forma a minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre os valores respostas experimentais e calculados pela rede neuronal. Para se efetuar estes cálculos utiliza-se o algoritmo *Backpropagation*. Este é baseado na regra de aprendizagem por correção de erro cujo propósito é aplicar uma seqüência de ajustes corretivos aos pesos sinápticos.

Os ajustes dos erros corretivos são projetados para aproximar passo a passo o sinal de saída. Este algoritmo é de natureza estocástica, ou seja, possui a tendência a oscilar aleatoriamente em torno da verdadeira direção que leva a um mínimo global na superfície de erro da rede (HAYKIN, 2001).

FIGURA 2.5 - FUNÇÕES DE TRANSFERENCIA UTILIZADAS PELO PROGRAMA DE REDE NEURONAL



Ele pode ser visto como uma generalização do algoritmo de ajuste de erros, mínimo quadrado médio, ou seja, uma derivação do gradiente descendente, que é utilizado para o calculo de sistemas lineares.

A diferença entre os dois métodos de minimização dos resíduos é que o algoritmo *Backpropagation* utiliza apenas um subconjunto de dados entrada e saída de cada vez. Enquanto, que o método do gradiente tradicional emprega todos os dados do conjunto de aprendizado.

Na aprendizagem por retropropagação os fluxos de sinais entre o sinal da função e o sinal do erro possuem sentidos contrários: um para frente, a propagação, e um no sentido contrário, a retropropagação.



O erro quadrático médio é calculado pela Equação 2.7:

$$E = \sum_{n=1}^{NP} \sum_{k=1}^P (y_{kn} - O_{kn})^2 / n \quad (2.7)$$

onde:

E = erro quadrático de treinamento

NP = número de pontos do conjunto de treinamento

P = número de saídas da rede neuronal

y = valor experimental

O = valor previsto pela rede neuronal

n = número de observações (treinamento ou teste).

Os pesos são calculados através do algoritmo backpropagation, Equação 2.8:

$$W_{ij}^{m+1} = W_{ij}^m + \Delta W_{ij}^m \quad (2.8)$$

onde m = número da iteração.

O ajuste dos pesos é feito de acordo com a Equação 2.9:

$$\Delta W_{ij}^m = -\eta \frac{\partial E}{\partial W_{ij}^m} \quad (2.9)$$

onde  $\eta$  = fator de aprendizado.

O fator de aprendizado ou taxa de aprendizagem é apenas uma constante de proporcionalidade que aumenta ou diminui a intensidade da correção dos pesos dada pelo gradiente do erro e em alguns algoritmos ele tende a aumentar quando o resíduo quadrático tem a tendência de diminuição e diminuir quando tem tendência a aumentar. Então a constante de tempo média do erro, ou seja, a ação de filtragem da componente de menor sinal de erro, é inversamente proporcional ao parâmetro taxa de aprendizagem. A aprendizagem por correção de erro está fundamentada na filtragem ótima (HAYKIN, 2001).

A escolha do valor de  $\eta$  é totalmente empírica, havendo recomendações na literatura tanto para  $\eta < 0,1$  até para  $\eta > 10$ . Ao monitorar o desvio quadrático do teste, podem-se observar oscilações nos desvios conforme o avanço do processo

iterativo. Isto pode ajudar a escolher o limite inferior e superior deste parâmetro durante o processo de treinamento da rede.

Após o ajuste dos pesos, o cálculo se reinicia por um processo iterativo até que o critério de parada seja alcançado. Dois critérios de parada são normalmente utilizados: o treinamento é interrompido após um número fixo de iterações ou considera-se que o algoritmo convergiu quando o erro quadrático médio atingiu um valor suficientemente pequeno. Avaliando-se o erro médio de previsão de teste escolhe-se a melhor configuração de rede neuronal.

A fase de aprendizado ou treinamento é basicamente um problema de otimização e freqüentemente exige a apresentação de dados à rede milhares de vezes. Desta forma, deparamos com as mesmas dificuldades associadas à uma otimização tais como, convergência, existência de mínimos locais, esforço computacional e outros, não existindo até hoje algoritmos eficientes para assegurar um “treinamento ótimo”.

O conjunto de treinamento é um fator limitante para se configurar uma rede neuronal. Segundo observações de CÔCCO (2003), se o conjunto de dados para treinamento for muito específico com um intervalo de domínio pequeno para uma certa porção de dados totais, os resultados previstos pelo modelo de rede treinada podem ser menos preciso.

Para se configurar uma rede neuronal é importante analisar a influência de parâmetros da rede no mapeamento do conjunto de dados apresentado na etapa de treinamento. As principais variáveis são:

- Função de ativação;
- Pesos;
- Bias;
- Fator de aprendizado ( $\eta$ );
- Intervalo de normalização dos pontos experimentais;
- Número de neurônios na camada oculta;
- Número pontos no conjunto treinamento

Para desenvolver uma rede neural hoje em dia, contamos com inúmeras ferramentas:

- programas comerciais;

- simuladores comerciais;
- auxiliares matemáticos comerciais (Matlab);
- programas gerados a partir do equacionamento disponível na literatura;
- placas de microcomputadores com chips neurais;
- bibliotecas de programação (DLL – Dynamic Link Library).

Tais ferramentas são possíveis de serem utilizadas em qualquer situação devido ao fato de que as redes neurais não precisam de conhecimento prévio das relações de entrada e saída do processo.

#### **2.5.4 Treinamento e otimização**

O sucesso da modelagem e controle de processos via rede neuronal depende fortemente do conhecimento das principais variáveis do processo, além de se ter uma base de dados de boa qualidade, ou seja, que contenha todas as informações importantes do processo e no domínio desejado.

A técnica ideal para otimizar o processo consiste em varrer completamente o espaço das variáveis operacionais do processo e selecionar as condições de operação que efetivamente minimizam a função objetivo. Isso pode não ser feito devido a dificuldades na resolução do modelo matemático ou por restrições na obtenção de dados experimentais.

Num procedimento de otimização uma rede neuronal leva vantagem em relação aos outros tipos de modelos matemáticos pelo fato de que o tempo de simulação é muito pequeno, independente da configuração da rede. Dada a velocidade de cálculo da rede, torna-se possível a busca exaustiva em sistemas multivariáveis de amplo domínio.

#### **2.5.5 Redes neurais e a tecnologia de alimentos**

Os procedimentos tradicionais que relatam parâmetros de qualidade em alimentos para determinadas condições de processo são baseados em métodos estatísticos. Os modelos estatísticos ou equações de regressão são objetos de

suposições e de cautela nas análises experimentais (NI & GUNASEKARAN, 1998). Quando as previsões de dados para garantir a qualidade de alimentos consistem em muitas entradas e saídas de variáveis intrínsecas do sistema, a análise estatística torna-se complicada e de difícil interpretação. Um modelo matemático adaptável através de sucessivos experimentos seria mais indicado, pois traria mais confiabilidade para a modelagem e seria capaz de incorporar informações e comportamentos durante o experimento.

CHEN et al. (2001), treinaram uma rede neuronal para otimizar as mudanças da qualidade durante a secagem osmótica e convectiva de *blueberries*, utilizando o algoritmo de aprendizado *backpropagation* e o modelo neuronal multicamadas (variando de 1 a 3) com 3 entradas (tempo de contato, temperatura e concentração da solução osmótica) e 4 saídas (tempo de secagem convectiva, cor, textura e proporção de rehidratação). A melhor performance da rede foi escolhida variando-se os parâmetros, função de transferência (sigmoidal, tangente hiperbólica e linear), número de neurônios na camada oculta (5 a 15) e camadas (1 a 3) ocultas, número de apresentações (2000 a 20000) e o fator de aprendizagem que era dinâmico. Eles confirmaram a melhor performance do modelo de redes neurais para a otimização do processo com 1 camada oculta e 10 neurônios na camada oculta, 20000 apresentações e função de transferência tangente hiperbólica. Com as redes neuronais obteve-se uma excelente previsão do processo sendo melhor quando comparado ao método de regressão múltipla.

As propriedades do ar de secagem também foram previstas pelo modelo de rede neuronal. MITTAL & ZHANG (2003), desenvolveram um modelo neuronal, com múltiplas camadas ocultas de neurônios, baseado na carta psicométrica para o cálculo em tempo real das propriedades do ar requeridas para a secagem de alimentos pós-colheita. O arquivo de dados para treinamento e teste da rede foi gerado a partir de modelos matemáticos psicométricos. O erro relativo gerado para previsão das características do ar foi menor que 5%.

CUBILLOS et al. (1996), modelaram e simularam o processo de secagem de partículas sólidas a partir de dados coletados pelas equações de balanço de massa e energia associadas com as redes neuronais. O objetivo foi prever o comportamento do processo de secagem por leito fluidizado. As redes apresentaram melhor desempenho que os modelos fenomenológicos, mesmo que ainda os

mecanismos de transporte envolvidos nesta operação não sejam facilmente explicados matematicamente.

VALE & ZAMBIAZI (2000), também obtiveram boa performance das redes neurais para a previsão da estabilidade de óleos vegetais a partir de dados de sua composição química. O “shelf life” do óleo de soja foi medido a partir da avaliação dos dados de entrada, ácidos graxos, fenóis, tocoferóis e a composição individual em ácidos graxos, em função do índice de peróxido, variável de saída.

As redes neurais também foram utilizadas para a previsão das mudanças na qualidade sensorial e estrutural de ervilhas cozidas temperaturas de 70 a 100°C. XIE & XIONG (1999), compararam o seu desempenho com o modelo de Arrhenius modificado por Davey e com o modelo primário hiperbólico, constatando também uma excelente previsão das redes neurais.

### 3 COMPOSIÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO YACON

#### 3.1 INTRODUÇÃO

O yacon cientificamente conhecido como *Polymnia sonchifolia* Poeppig & Endlicher ou *Smallanthus sonchifolia* pertence à família das *Compositae*, sendo originário dos Andes. (GRAEFE et al., 2003; HERMANN et al., 1997-98).

O tubérculo de yacon apresenta textura agradável, similar com a da maçã e pêra, e um sabor doce e suave, contendo grande quantidade de água, aproximadamente 90,8% de umidade (CAPITO, 2000; HERMANN et al., 1997-98).

A maioria das raízes armazena carboidratos na forma de amido, já a yacon e várias plantas da família *Compositae* armazenam os carboidratos na forma de frutanos que são polímeros de frutose (GRAEFE et al., 2003; CAPITO, 2001). OHYAMA et al. (1990) determinaram o conteúdo de carboidratos solúveis nos tubérculos de yacon armazenada sob refrigeração por 96 dias após colheita, sob refrigeração, determinando o conteúdo total de 773 mg/g em base seca, equivalente em média a 9,93% do total do peso do yacon. A glicose e sacarose correspondem a 2,98% do peso total.

Entre os minerais, o potássio é o macro-elemento presente em maior quantidade, 1,34% na matéria seca seguido pelo cálcio (0,14%), magnésio (0,12%), fósforo (0,08%) e sódio (0,06%), (INFORME TECNICO, 95/96).

HERMANN et al. (1997-1998) determinaram a composição química do yacon em algumas regiões diferentes dos Andes latino-americanos e verificaram que sua composição apresenta variações com a região de plantio.

Neste capítulo objetivou-se caracterizar os tubérculos de yacon adquiridos na região de Curitiba – PR por meio de análises físico-químicas.

## 3.2 MATERIAL E MÉTODOS

### 3.2.1 Material

As amostras de yacon, *Polymnia sonchifolia* Poepp. & Endlicher foram adquiridas de um produtor da região metropolitana de Curitiba. As amostras foram escolhidas aleatoriamente observando os mesmos padrões de integridade da casca da superfície, ausência de rachaduras e doenças e as mesmas dimensões. As análises foram feitas 1 (hum) dia após colheita sendo as amostras mantidas sob refrigeração a mais ou menos 7°C.

### 3.2.2 Métodos

Foram feitas análises para determinar umidade e substâncias voláteis, resíduos mineral fixos, gordura total, proteínas, sólidos solúveis totais, pH, açúcares redutores em glicose e açúcares não redutores em sacarose segundo normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz (IAL, 1985). A fibra alimentar foi determinada segundo a AOAC, (1997). O cálculo da energia total metabolizável foi calculado a partir da energia procedente dos nutrientes, considerando os fatores de conversão de Atwer:  $Kcal = (4 \times (g) \text{ proteínas}) + (4 \times (g) (\text{carboidratos totais} - \text{fibra alimentar})) + (9 \times (g) \text{ lipídios})$ , (USP, 2002). Determinou-se o conteúdo de cálcio, ferro e potássio pelo método de absorção atômica de chama (AOAC, 2000). O conteúdo de fósforo foi determinado pelo método colorimétrico por espectrofotometria de ultravioleta (AOAC, 2000).

## 3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das análises físicos e químicas realizadas nas amostras de yacon, utilizadas durante o experimento, estão apresentados na Tabela 3.1.

TABELA 3.1 – PARÂMETROS FÍSICOS E QUÍMICOS DA YACON

PARÂMETRO	DETERMINAÇÃO
Umidade e substâncias voláteis (g/ 100 g)	90,63
Resíduo mineral fixo (g/ 100 g)	0,39
Gordura total (g/ 100 g)	<0,10
Proteínas (g/ 100 g)	0,33
Fibras alimentares (g/ 100 g)	1,50
Carboidratos (g/ 100 g)	7,05
Valor calórico total (Kcal/ 100 g)	29,52
Graus Brix a 20°C	9,5°
pH a 25°C	4,18
Açúcares redutores em glicose (g/ 100 g)	2,54
Açúcares não redutores em sacarose (g/ 100 g)	1,81
Açúcares totais (g/ 100 g)	4,35
Cálcio (mg/ 100 g)	30,21
Ferro (mg/ 100 g)	0,70
Fósforo (mg/ 100 g)	<5,00
Potássio (mg/ 100g)	120,8

O teor de umidade, cinzas, proteínas e lipídios das raízes tuberosas de yacon estão dentro da faixa encontrada por HERMANN et al., (1997-98). CAPITO (2001) encontrou no tubérculo cultivado em São Paulo, 90,8% de umidade, 0,41% de resíduo mineral fixo e 0,32% de proteína, estes resultados estão compatíveis com os apresentados na Tabela 3.1.

O teor de açúcares totais está dentro da faixa encontrada por HERMAM et al. (1997-98) quando determinou a média total de açúcares livres, 1,8 a 4,2%, na yacon por HPLC.

O teor de fibras totais, Tabela 3.1, foi superior ao encontrado por HERMAM et al., (1997-98). Esta diferença pode ter ocorrido porque o local de plantio da referência foi no Equador e o método de determinação também foi diferente do utilizado neste trabalho. A concentração de sólidos solúveis (°Brix) encontra-se dentro da faixa calculada por HERMAM et al., (1997-98).

O potássio é o mineral encontrado em maior quantidade no yacon seguido do cálcio conforme INFORME TÉCNICO (95/96) e HERMAM et al., (1997-98). De acordo com a tabela de composição de alimentos apresentada por FRANCO (1999) o conteúdo de potássio e cálcio do tubérculo de yacon é semelhante ao da banana maçã.

Tendo em vista os resultados obtidos, na caracterização dos parâmetros físicos e químicos da yacon, podemos dizer que o valor calórico das raízes



tuberosas foi aproximadamente 29,52 Kcal a cada 100g consumidas. Este valor energético pode ser considerado baixo, sendo diretamente relacionado, segundo CAPITO (2001), à época de colheita e aos fatores climáticos da cultura.

### 3.4 CONCLUSÃO

Na sua composição o tubérculo de yacon apresenta alto teor de potássio, cálcio, teor de açúcares totais baixo, sendo que o teor de açúcares redutores, corresponde a 1,5 vezes o de açúcares não redutores e baixo valor calórico 29,5 Kcal/100g.

A composição física e química do yacon cultivado na região de Curitiba é semelhante à do tubérculo cultivado no estado de São Paulo. O yacon cultivado no Equador diferenciou-se apenas no teor de fibras.

## 4 PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO

### 4.1 INTRODUÇÃO

Por causa dos grandes benefícios que o pré-tratamento osmótico agrega ao alimento desidratado, nos últimos anos estão sendo publicados diversos artigos sobre este assunto. As constantes pesquisas, sobre a desidratação osmótica de frutas e vegetal levaram pesquisadores a fundar uma comissão europeia intitulada *"Improvement of food quality by application of osmotic treatments in conventional and new processes"* da qual 13 países europeus fazem parte (RASTOGI et al., 2002).

O processo de desidratação osmótica, também conhecida como desidratação-impregnação (DII) baseia-se na imersão de alimentos, inteiros ou fatiados, em soluções hipertônicas (açúcares, cloreto de sódio, sorbitol, glicerol), originando dois fluxos simultâneos opostos: uma saída da água do produto para a solução e uma migração de solutos da solução para o sólido. (RAOULT – WACK, 1994).

Para vegetais e frutas muitos processos de desidratação visam alcançar em um curto espaço de tempo, alto grau de desidratação com um ganho de sólido relativamente pequeno (LENART, 1996). Pode-se optar por produtos açucarados como é o caso das indústrias Asiáticas como Índia e Tailândia que produz em pequenas escalas mamão papaya desidratado conhecido popularmente como *Tooti-fruti*.

Segundo AZOUBEL (1999), que desidratou osmoticamente tomate cereja durante 6 horas em diferentes concentrações de misturas de cloreto de sódio mais sacarose e apenas cloreto de sódio, observou que o ganho de sólidos teve tendência a aumentar sendo o menor ganho nas menores concentrações da mistura (10%), a qual atingiu o equilíbrio primeiro. EL-AOUAR (2001), desidratou cubos de mamão formosa durante 48 horas de processo e o aumento ocorreu mais intensamente na primeira hora do processamento, chegando ao equilíbrio logo depois.

VENTURA et al., (2003), otimizaram o processo de desidratação osmótica de yacon visando à máxima perda de umidade e mínima incorporação de sólidos. As

melhores condições otimizadas de temperatura foram na faixa de 30 a 33°C, concentração da solução 63 a 69°Brix e tempo de imersão de 84 a 120 minutos, determinadas a partir da Metodologia de Superfície de Resposta. Foram obtidas perdas de umidade da ordem de 53 a 55% e de incorporação de sólidos de 6,02 a 6,46% do peso total inicial.

Segundo RASTOGI, et al. (2002) & LERICI, et al. (1985) a forma ou formato do alimento é uma das principais variáveis no pré-tratamento osmótico que influencia no processo de transferência de massa.

## 4.2 OBJETIVO

No pré-tratamento osmótico da yacon foi determinada a cinética de desidratação osmótica durante 3 horas em diferentes condições de temperatura, concentração e espessura para verificar o tempo necessário para o pré-tratamento.

## 4.3 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.3.1 Material

O tubérculo de yacon *Polymnia sonchifolia* Poepp. & Endlicher, foi adquirido na região metropolitana de Curitiba. O processamento ocorreu 1 (hum) dia após a colheita estando os tubérculos armazenados sob refrigeração.

A amostragem da matéria-prima foi baseada no seu tamanho, uniformidade da casca e na ausência de rachaduras.

O agente desidratante utilizado no pré-tratamento osmótico foi o sorbitol em solução aquosa 70% da marca Synth.

#### 4.3.2 Métodos

Para a amostragem dos grupos experimentais correspondentes de yacon, as características como dimensão, lesão na superfície e cor, foram observados como critério de eliminação.

Os tubérculos foram lavados, depelados e cortados em fatias circulares. Para o pré-tratamento foi empregada a proporção amostra / solução osmótica de 1:10 (p/p). Utilizou-se um sistema físico que constou de um banho termostático com agitação de 50 rpm, Figura 4.1. Após o pré-tratamento, as amostras foram enxaguadas com água destilada por 20 segundos, para retirar o excesso de solução osmótica, secas em papel absorventes e pesadas. As amostras foram levadas à estufa 105°C por 24 horas para a determinação dos sólidos totais.

FIGURA 4.1 – BANHO TERMOSTÁTICO UTILIZADO PARA OS EXPERIMENTOS DO PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO



##### 4.3.2.1 Determinação de parâmetros característicos do pré-tratamento osmótico

Para descrever a cinética do processo de pré-tratamento osmótico foram calculados a redução total do peso (WR) (Equação 3.1), o ganho de sólidos (SG) (Equação 3.2) e perda de percentual de água (WL) (Equação 3.3) a partir do

conteúdo de matéria seca inicial (gi.m.s.) segundo metodologia utilizada por SHARMA, et al. (2000):

$$WR = \frac{(W_0 - W)}{S_0} \quad (3.1)$$

$$SG = \frac{(S - S_0)}{S_0} \quad (3.2)$$

$$WL = WR + SG \quad (3.3)$$

O percentual de perda de água foi medido retirando-se amostras, previamente identificadas, em intervalos de 15 minutos, até totalizar 3 horas de experimento.

#### 4.3.2.2 Determinação do tempo de pré-tratamento osmótico

Foram testadas algumas condições de espessura das fatias (2 - 3 mm), concentração (60 - 68 °Brix) e temperatura (30 - 40 °C) da solução osmótica para a determinação do tempo de pré-tratamento. Com esta determinação será avaliado o tempo necessário para que ocorra a máxima transferência de massa entre as fatias de yacon e a solução osmótica, Tabela 4.1.

TABELA 4.1 – CONDIÇÕES DO PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO PARA DETERMINAÇÃO DE PARAMETROS DA CINÉTICA

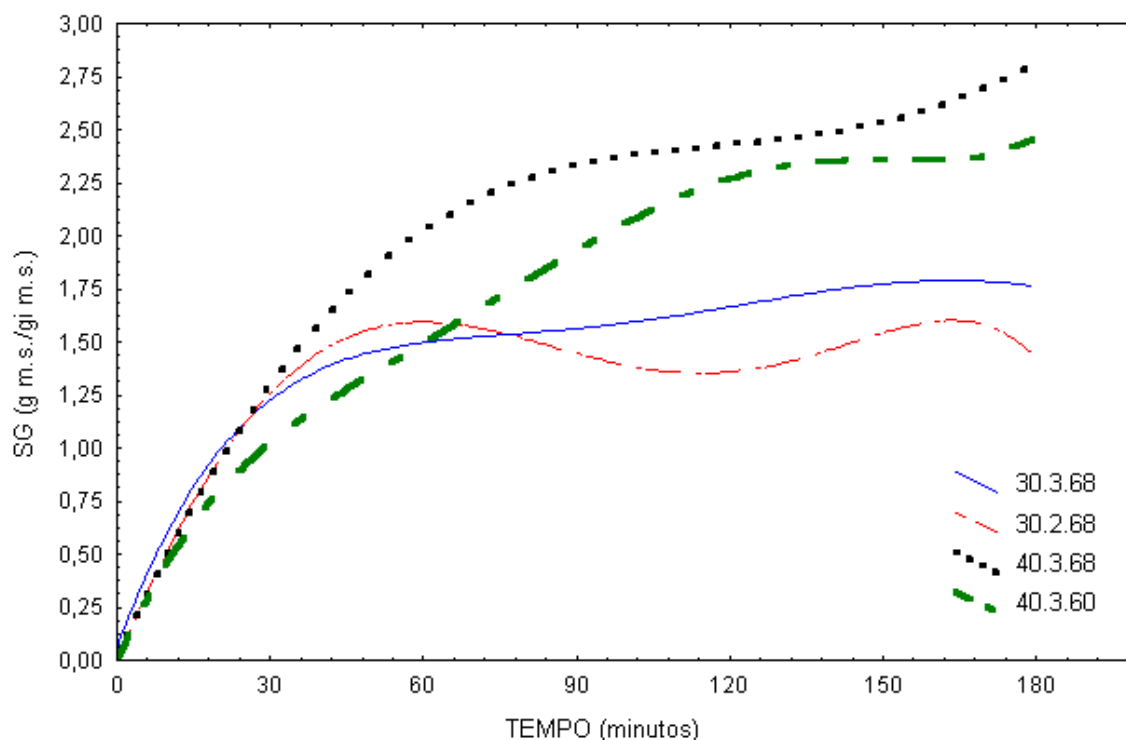
Temperatura (°C)	Espessura (mm)	Concentração (°Brix)	Código
40	3	60	40.3.60
40	3	68	40.3.68
30	3	68	30.3.68
30	2	68	30.2.68

## 4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.4.1 Determinação do tempo do pré-tratamento osmótico

Observa-se na Figura 4.2 a tendência das fatias do yacon em aumentar a quantidade de sólidos totais. As condições de temperatura, espessura e concentração, codificadas como 30.2.68 e 30.3.68, Tabela 4.1, as quais se diferenciam das 2 (duas) demais condições pela menor temperatura atingiram a tendência ao equilíbrio primeiro ou seja a quantidade de sólidos que entrou no produto foi menor que a temperatura de 40°C no período de 3 horas de processo. Pode-se observar que o aumento da concentração da solução osmótica aumentou a entrada de sólidos nas fatias. Para a mesma condição de temperatura e espessura no pré-tratamento, 40.3.60 e 40.3.68, a maior concentração da solução osmótica 68°Brix aumentou 13,5% a mais, a entrada de sólidos nas fatias de yacon. O ganho de sólidos tem tendência a aumentar com o aumento do tempo de pré-tratamento até atingir o equilíbrio, por isso quanto menor o tempo do pré-tratamento menos alterado estruturalmente estará o produto. O tempo de 3 horas de pré-tratamento testado não foi suficiente para o sistema fatias e solução osmótica entrar em equilíbrio.

FIGURA 4.2 – CINÉTICA DE GANHO DE SÓLIDO DURANTE 3 HORAS DE PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO



É possível visualizar na Figura 4.3 que nos primeiros 30 minutos do pré-tratamento houve a maior taxa de ganho de sólidos. Ao longo do tempo a taxa diminuiu com tendência a permanecer constante. Estes resultados estão de acordo com os determinados por CHUA et al. (2003), KOWALSKA & LENART (2001) quando verificaram que a maior transferência de massa entre a solução e o produto ocorre na primeira hora de desidratação.

A condição codificada 30.2.68 teve taxa inicial constante de entrada de sólidos que pode ter sido favorecida pela menor espessura, Figura 4.3.

Durante a desidratação, nas diferentes condições, observa-se no período de uma hora de processo a maior retirada de água, Figura 4.4. Após esse período, o processo foi atingindo a tendência ao equilíbrio. Observando-se as mesmas condições de temperatura, 40°C, e espessura, 3 mm, a maior concentração, 68°Brix, retirou 6% a mais de água das fatias comparando-se com a concentração de 60°Brix, considerando-se o tempo de 1 (uma) hora de pré-tratamento. O aumento da concentração na solução osmótica aumentou a pressão osmótica sobre o material favorecendo a retirada de água, estando este resultado de acordo com KARATHANOS & KOSTARAPOULOS (1995). A temperatura de 40°C aumentou em 35% a retirada de água do produto no período de 1 (uma) hora de processo comparando-se os valores das condições 30.3.68 e 40.3.68, Tabela 4.1. A taxa mostrou os maiores valores nos primeiros 30 minutos, diminuindo à medida que diminuía a troca de massa com o sistema Figura 4.5, as maiores taxas foram para as condições de maior temperatura 40.3.68 e 40.3.60.

FIGURA 4.3– TAXA DO GANHO DE SÓLIDOS DA YACON DURANTE 3 HORAS DE PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO

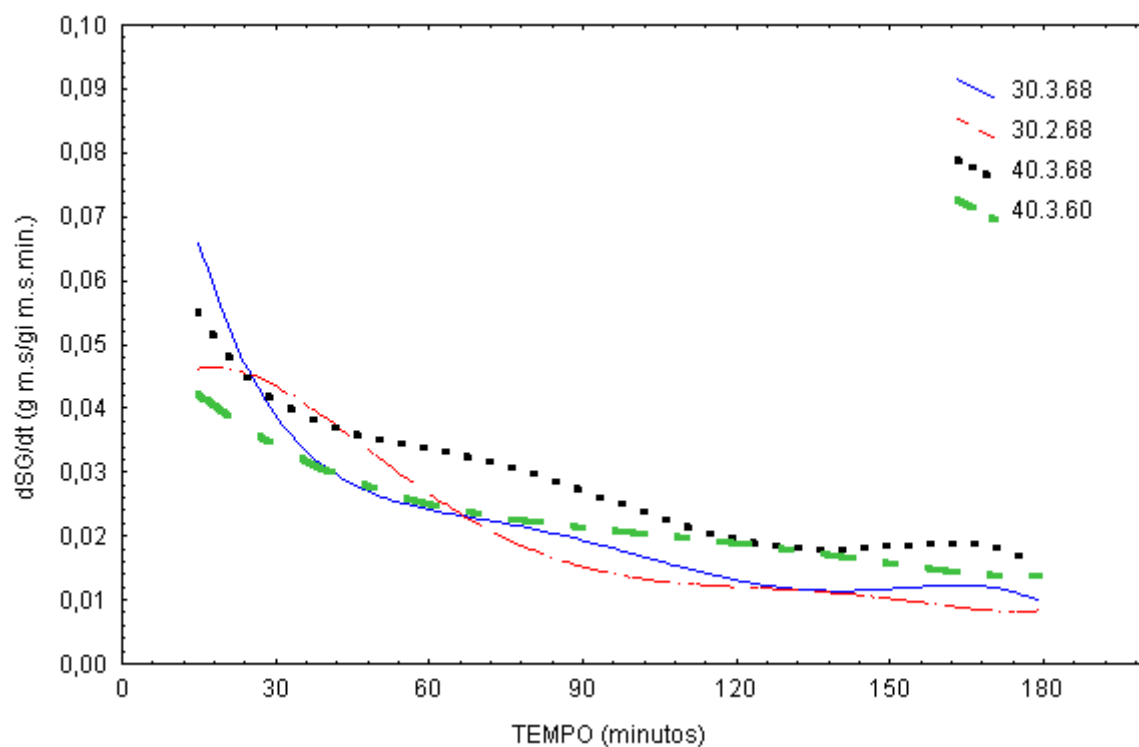
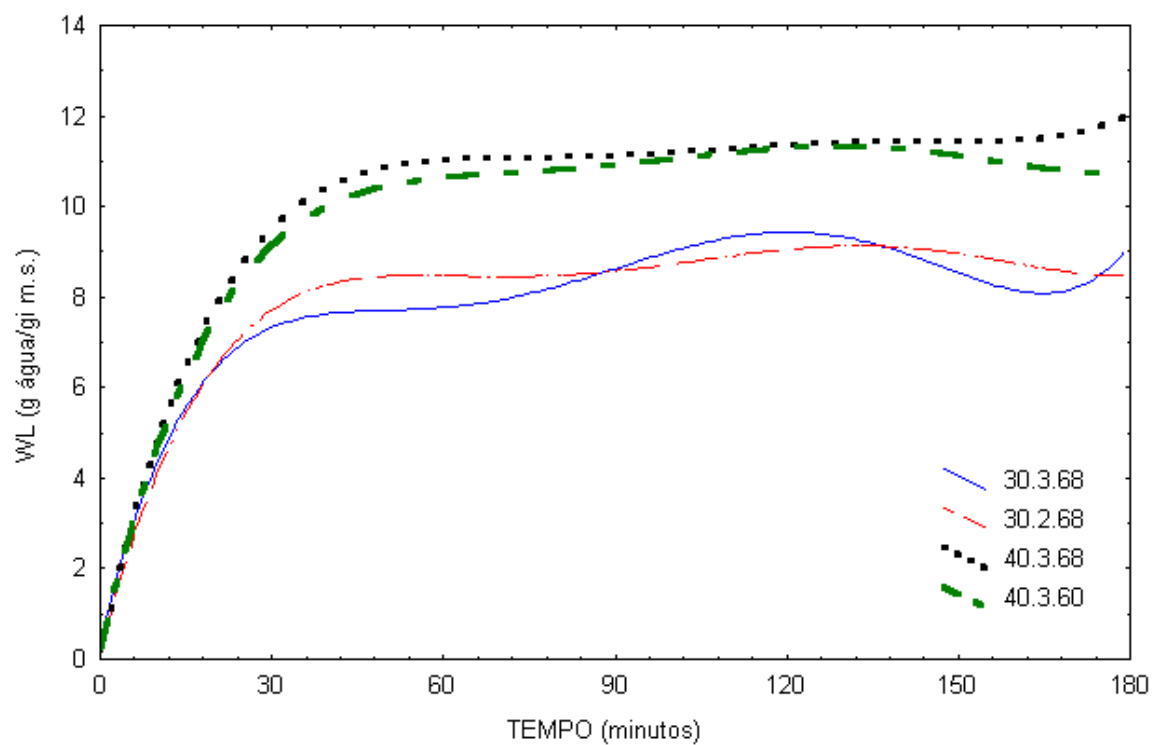


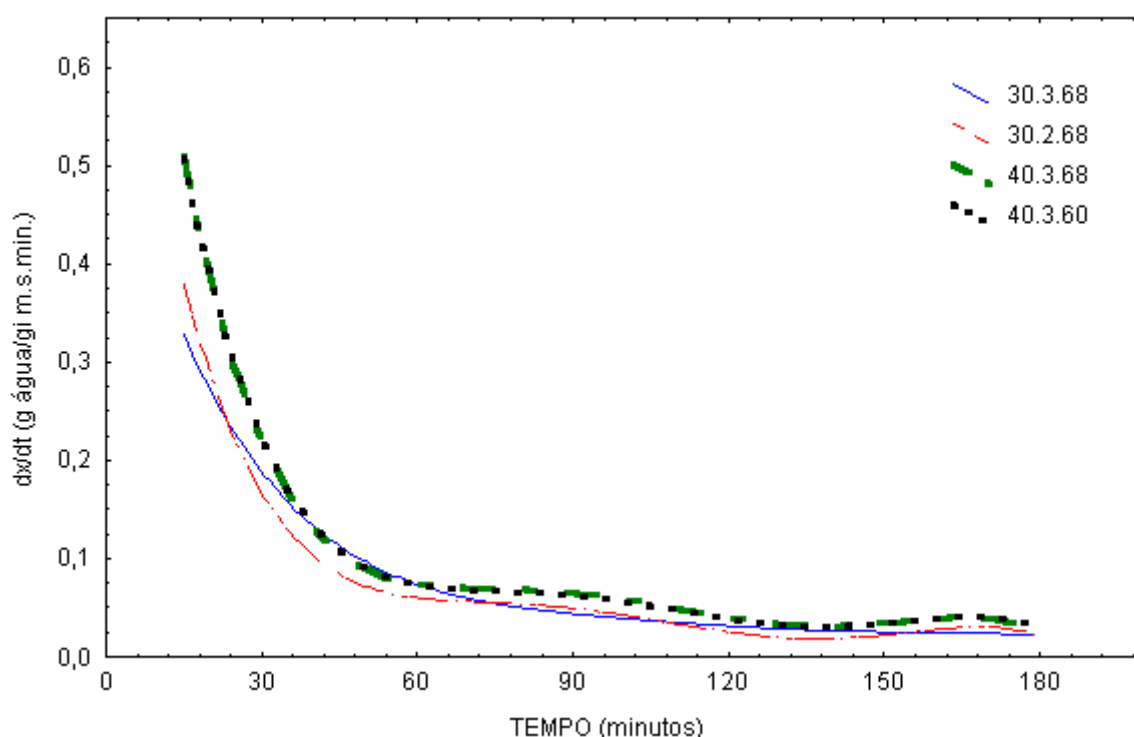
FIGURA 4.4 – PERDA DE ÁGUA DA YACON EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO





Comparando-se as Figuras 4.4 e 4.2, observa-se que a percentagem da perda de água é bem maior que o de ganho de sólidos. Para o presente estudo, este fato é extremamente importante, uma vez que se deseja preservar ao máximo as características da fruta “in natura”, incorporando-se menos sólido. De acordo com LENART (1996), o processo de desidratação deve ser realizado por um período de tempo pequeno suficiente para atingir altas taxas de perda de água e ganho de sólidos relativamente baixos.

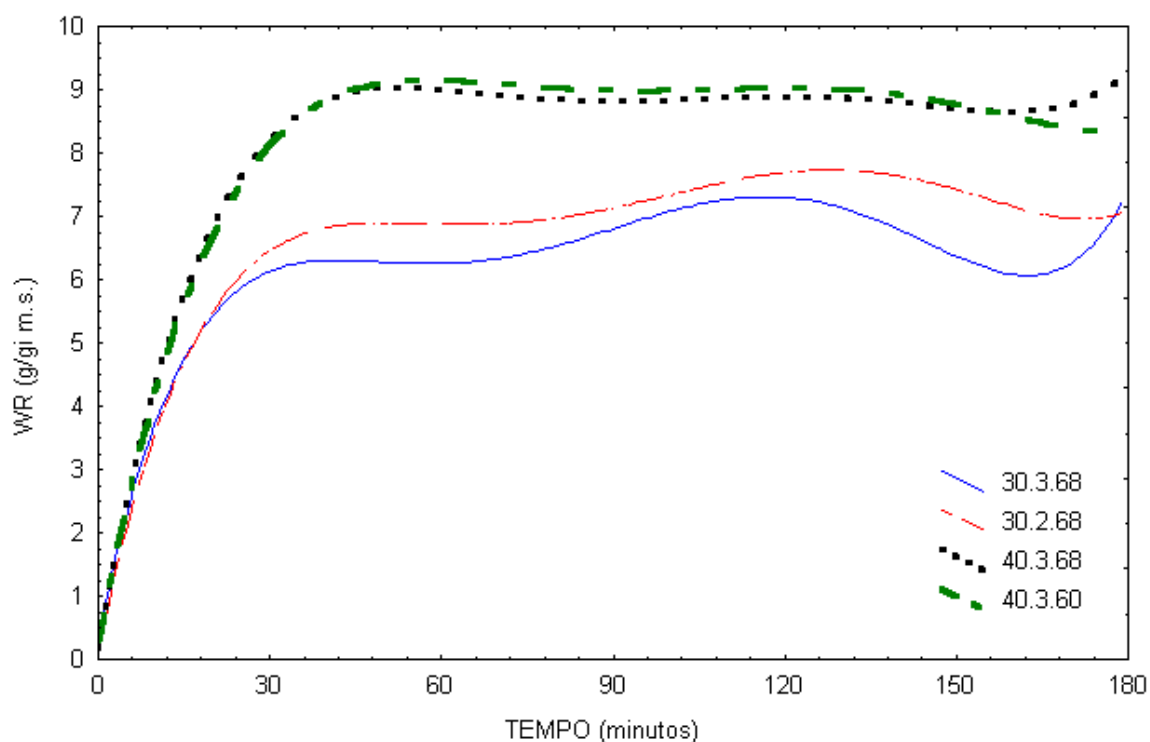
FIGURA 4.5 – TAXA DE PERDA DE ÁGUA DA YACON EM DIFERENTES CONDIÇÕES



A redução do peso do yacon Figura 4.6 nas condições testadas foi proporcional à retirada de água Figura 4.4 sendo os valores de perda de água superiores ao de perda de peso.

A cinética de transferência de massa da yacon mostrou que no tempo de 1 hora de pré-tratamento foi possível retirar a maior quantidade de água com o sistema alcançando a tendência ao equilíbrio. Este resultado está de acordo com o encontrado por VENTURA (2003), que desidratou osmoticamente a yacon utilizando o sorbitol como agente desidratante e o tempo para um menor ganho de sólidos e maior perda de água encontra-se entre 1 e 2 horas.

FIGURA 4.6 – REDUÇÃO DO PESO DA YACON DURANTE O PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE TEMPERATURA, ESPESSURA E CONCENTRAÇÃO



#### 4.5 CONCLUSÃO

O tempo de pré-tratamento osmótico determinado que resultou em um menor ganho de sólidos e maior retirada de água foi de 1 (uma) hora. O ganho de sólidos apresentou tendência a aumentar com o tempo para a temperatura de 40°C e na temperatura de 30°C alcançou a tendência ao equilíbrio a partir de 2 horas de pré-tratamento. Nos primeiros de 30 minutos ocorre a maior taxa de entrada de sólidos.

Para os demais ensaios foi fixado o tempo de pré-tratamento osmótico em 2 horas onde a transferência de massa tendeu ao equilíbrio.

## 5 SECAGEM OSMO-CONVECTIVA

### 5.1 INTRODUÇÃO

A qualidade dos produtos secos é resultado da integração de: material *in natura*, pré-tratamentos, secagem, estocagem e consumo final. A secagem pode ser melhorada conhecendo mais profundamente as interações entre condições de processo e qualidade do produto final com combinações de tecnologias e de pré-tratamentos.

A secagem osmo-convectiva que representa a secagem convectiva com pré-tratamento osmótico vem sendo realizada por diversos autores (CHUA et al, 2003; ALVES & SILVEIRA, 2002; NSONZI & RAMASWAMY, 1998) no intuito de preservar características sensoriais dos alimentos a serem desidratados.

O estudo da cinética de secagem está relacionado à predição do tempo de secagem, que representa um dado fundamental para o dimensionamento e a otimização de uma planta industrial envolvendo este processo. As taxas de secagem devem ser relacionadas para um determinado produto e para uma determinada operação (processo e equipamento), podendo ser estabelecidas mediante estudos de transferência de calor e massa, além dos possíveis mecanismos de migração interna de umidade. Sendo assim, podemos avaliar, projetar e/ou otimizar o processo de secagem (ROMERO et al., 1997).

TOGRUL & PEHLIVAN (2003), investigaram o comportamento de damascos durante a secagem convectiva. A taxa de secagem decresceu continuamente com o tempo, sem período constante, mostrando que o único mecanismo físico que domina a secagem do damasco é a difusão. A variação da temperatura no interior do damasco também foi medida em função da velocidade do ar de secagem e da temperatura do ar a qual teve maior influência na taxa.

ALVES & SILVEIRA (2002) verificaram na secagem osmo-convectiva de tomates que a agitação no pré-tratamento em diferentes velocidades não apresentou diferença significativa na retirada de água. A temperatura do processo de secagem convectiva exerceu maior influência, na cinética de secagem, do que a velocidade e

pressão de vácuo. As amostras desidratadas osmoticamente em menor tempo de secagem do que as amostras não desidratadas.

## 5.2 OBJETIVO

Estudar as curvas de secagem convectiva da yacon com e sem pré-tratamento osmótico. Determinar o tempo de secagem em função da temperatura para a velocidade e vazão do ar constante.

## 5.3 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.3.1 Matéria-prima

A matéria prima foi à mesma mencionada do capítulo 4, referente ao pré-tratamento osmótico no item 4.3.1.

### 5.3.2 Método

Na escolha dos grupos experimentais correspondentes de yacon, as características como, tamanho, cor e lesões na superfície foram avaliadas. Estes foram lavados, depelados e cortados em fatias circulares.

As condições do pré-tratamento foram, proporção amostra / solução osmótica 1:10 (p/p). O sistema físico da desidratação, consta de um banho termostático com controle de agitação (50 rpm) e temperatura. Após o pré-tratamento, as amostras foram enxaguadas com água destilada por 20 segundos, para retirar o excesso de solução osmótica, secas em papel absorventes e pesadas. Parte da amostra foi levada à estufa (105°C por 24 horas) para o cálculo da umidade e peso seco total. A outra parte, imediatamente após o pré-tratamento osmótico, foi levada ao secador convectivo para o término da secagem. A Figura 5.1 ilustra os

equipamentos utilizados no pré-tratamento osmótico (a) e na secagem convectiva (b). O esquema das condições utilizadas está apresentado na Figura 5.2.

FIGURA 5.1 – ILUSTRAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA EXPERIMENTAÇÃO



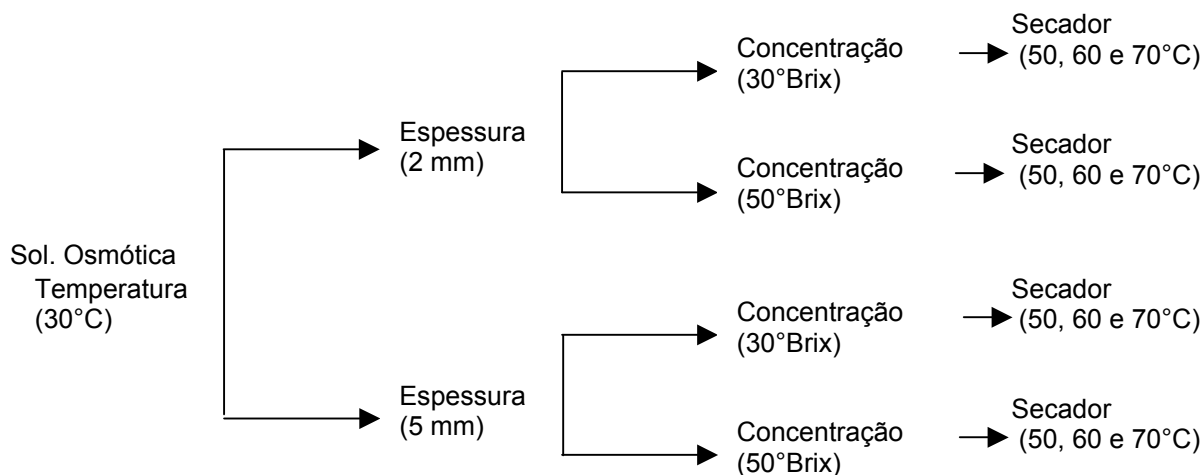
(a) banho termostático



(b) secador convectivo

As condições estudadas são mostradas no esquema da FIGURA 5.2. O secador conforme esquema apresentado na FIGURA 4.3 apresenta fluxo de ar horizontal com vazão de ar média de  $18 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . O sistema de circulação e recirculação do ar é por força de um exaustor. O ar é aquecido e reaquecido por meio de uma serpentina localizada na parte inferior do secador.

FIGURA 5.2 – ESQUEMA DAS CONDIÇÕES DO PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO UTILIZADO PARA A SECAGEM CONVECTIVA



Todas as amostras de yacon pré-tratadas nas condições descritas na FIGURA 5.2 foram levadas à estufa para secagem convectiva a temperaturas de 50, 60 e 70°C. A variação do peso das fatias foram medidas em intervalos de 15 minutos nas primeiras 3 horas de secagem e em intervalos de 30 minutos até completar 5 horas totais de processo. A escolha do tempo total de secagem foi fundamentada em experimentos realizados anteriormente.

A umidade relativa do ar, temperatura de bulbo úmido, bulbo seco em ambiente interno e externo da estufa foram controlados através de leitura direta em termômetro.

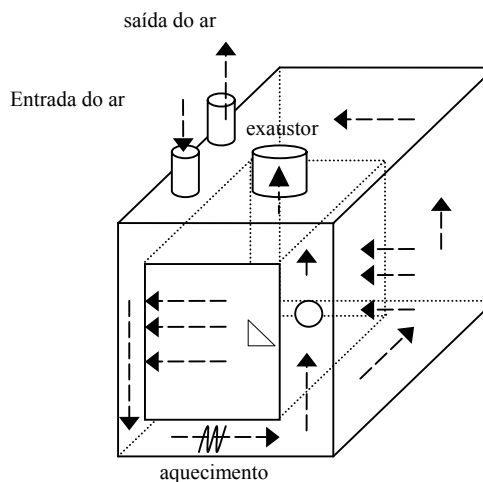
As amostras foram colocadas em cima de tela de nylon a fim de facilitar o esquema de pesagem. A cinética de secagem será analisada através do adimensional de umidade em base seca,  $x$ , Equação 5.1 em função do tempo e da taxa de secagem,  $dx/dt$ , Equação 5.2.

$$x = \frac{M_{(t)} - M_{(t+\Delta t)}}{M_{s0}} \quad (5.1)$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{M_{(t)} - M_{(t+\Delta t)}}{M_{s0} \cdot \Delta t} \quad (5.2)$$

Onde,  $M_{s0}$  é a massa seca da yacon após o pré-tratamento (g m.s),  $M_t$  é a massa total inicial no tempo  $t=0$  (g) e  $M_{(t+\Delta t)}$  é a massa total no tempo  $t= t+\Delta t$  (g).

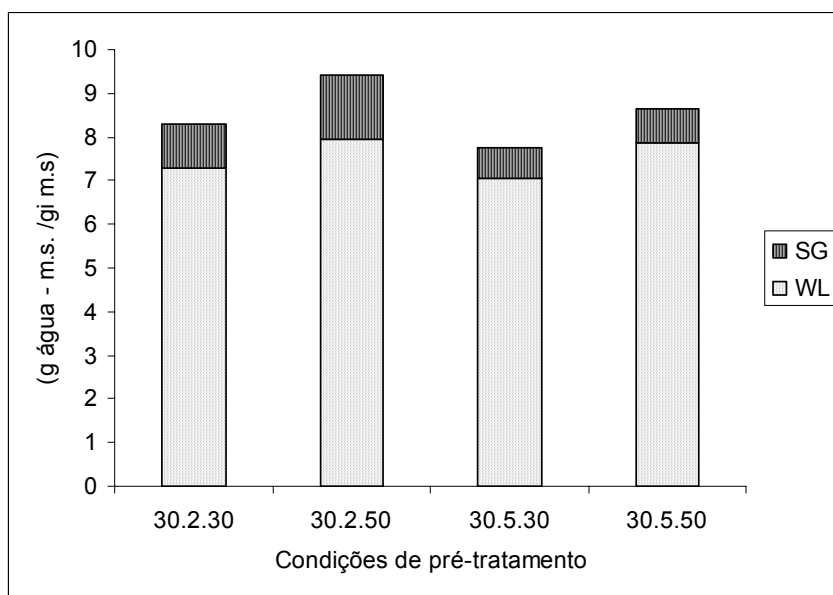
FIGURA 5.3 – ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO SECADOR CONVECTIVO



## 5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O processo de secagem foi feito imediatamente após as 2 horas de pré-tratamento osmótico, onde as amostras foram pesadas e uma parte foi levada à estufa para a determinação da massa seca total. A Figura 5.4 representa a proporção de ganho de sólidos e perda de água depois do processo osmótico mostrando que a condição de temperatura de 30°C, espessura de 5 mm e concentração de 50°Brix foi eficiente, promovendo uma maior retirada de água e um menor ganho de sólidos.

FIGURA 5.4 – PROPORÇÃO DE GANHO DE SÓLIDOS E RETIRADA DE ÁGUA DURANTE O PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO PARA AS DETERMINADAS CONDIÇÕES (TEMPERATURA. ESPESSURA. CONCENTRAÇÃO)



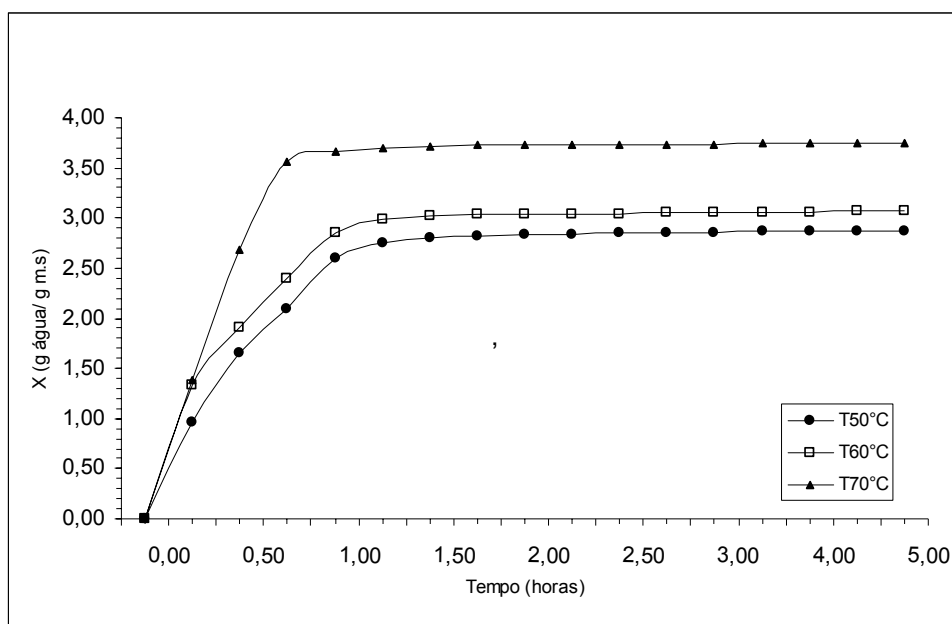
Então as amostras foram levadas ao secador em telas de nylon, pois em experimentos anteriores, as fatias em contato com a bandeja de metal oxidavam ficando com coloração escura, em tons de preto.

O secador de fluxo horizontal utilizado para os experimentos não apresentava fluxo de ar e temperatura interna constantes, e o fato de tempos em tempos (15 minutos) as amostras serem retiradas para a determinação da variação da umidade a temperatura decrescia em torno de 5 a 10°C. Evitando-se estas oscilações de temperatura e com o fluxo de ar constante seria possível medir com

maior precisão o tempo de secagem das fatias. Porém, o estudo realizado mostra a tendência do comportamento das fatias na secagem em função das temperaturas e dos pré-tratamentos osmóticos.

Na Figura 5.5 pode-se observar que a temperatura de 70°C retirou um maior teor de água, aproximadamente 3,7 Kg água/ Kg.m.s (quilograma de água por quilograma de massa seca inicial) e as temperaturas de 50°C e 60 °C retiraram respectivamente 2,8 e 3,0 Kg água/ Kg.m.s. Com relação ao tempo de secagem a temperatura de 70°C retirou mais água em menor tempo enquanto as temperaturas de 50 e 60°C alcançaram a tendência ao equilíbrio em um maior tempo com menor teor de água retirada.

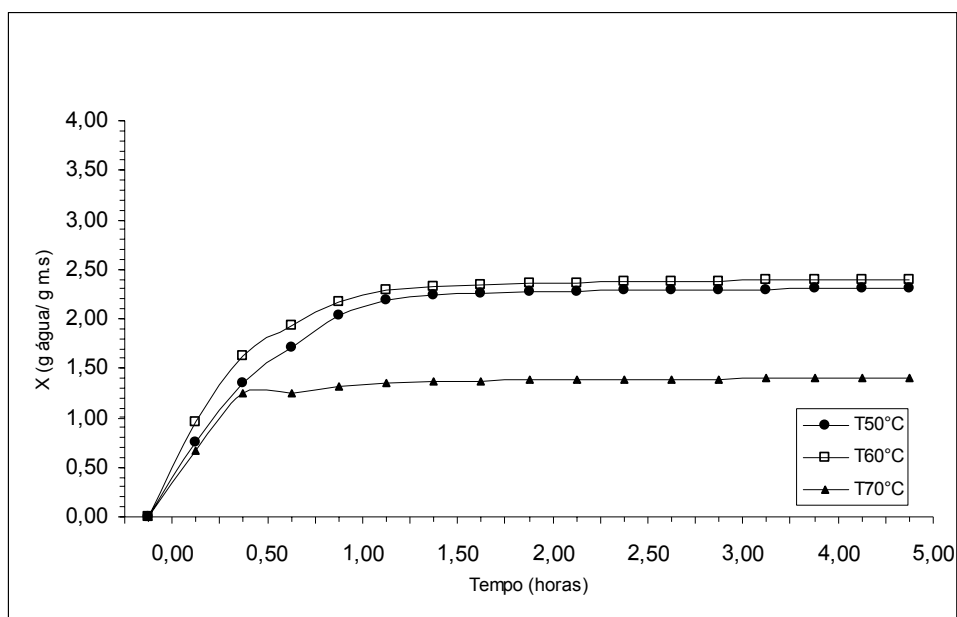
FIGURA 5.5 – GRÁFICO DA SECAGEM OSMO-CONVECTIVA DA YACON COM TEMPERATURA, ESPESSURA E CONCENTRAÇÃO DE 30°C, 2 mm E 30 °BRIX



A Figura 5.6 mostra o teor de água retirado das fatias de yacon com o tempo, para a concentração da solução osmótica de 50°Brix. Pode-se observar que a temperatura de 70°C não foi eficiente na retirada de água, 1,36 Kg água/Kg m.s., 1,5 horas, sendo a temperatura de 60°C que apresentou melhores resultados quanto a maior retirada de água, 2,36 Kg água/Kg m.s. em um menor tempo de secagem, 2 horas.



FIGURA 5.6 – GRÁFICO DA SECAGEM OSMO-CONVECTIVA DA YACON COM TEMPERATURA, ESPESSURA E CONCENTRAÇÃO DE 30°C, 2 mm E 50 °BRIX



Nas curvas apresentadas na Figuras 5.7 e 5.8, para as maiores espessuras das fatias, 5 mm, observa-se que o tempo para o término do período constante de secagem foi maior. Na Figura 5.7 a quantidade de água retirada durante a secagem foi maior e o aumento da temperatura do ar de secagem foi proporcional à quantidade de água retirada do yacon. A Figura 5.8, maior concentração da solução, mostra a maior resistência à retirada de água do yacon com a temperatura do ar de secagem a 70°C. Este fato pode ser explicado porque o alimento desidratado osmoticamente entrou em processo de secagem num estado que oferecia maior resistência à transferência de massa, tanto pela presença do soluto em sua superfície quanto pela maior compactação em que se encontrava sua estrutura celular devido ao encolhimento sofrido na etapa de desidratação osmótica. EL-AOUAR, (2001) & RAOULT-WACK, (1994) observaram o mesmo efeito no tempo de secagem com o aumento da temperatura.

FIGURA 5.7 – GRÁFICO DA SECAGEM OSMO-CONVECTIVA DA YACON COM TEMPERATURA, ESPESSURA E CONCENTRAÇÃO DE 30°C, 5 mm E 30 °BRIX

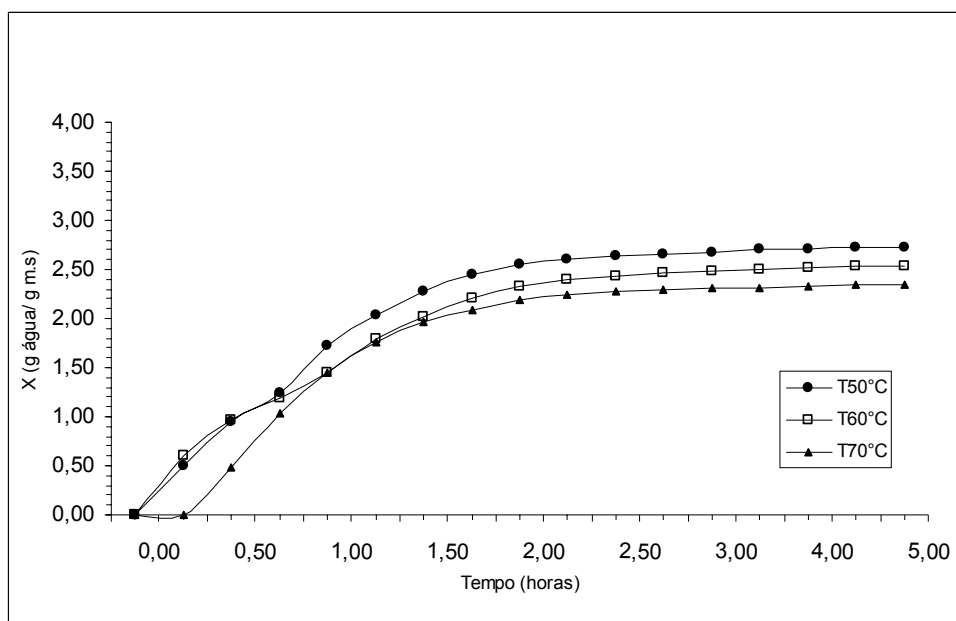
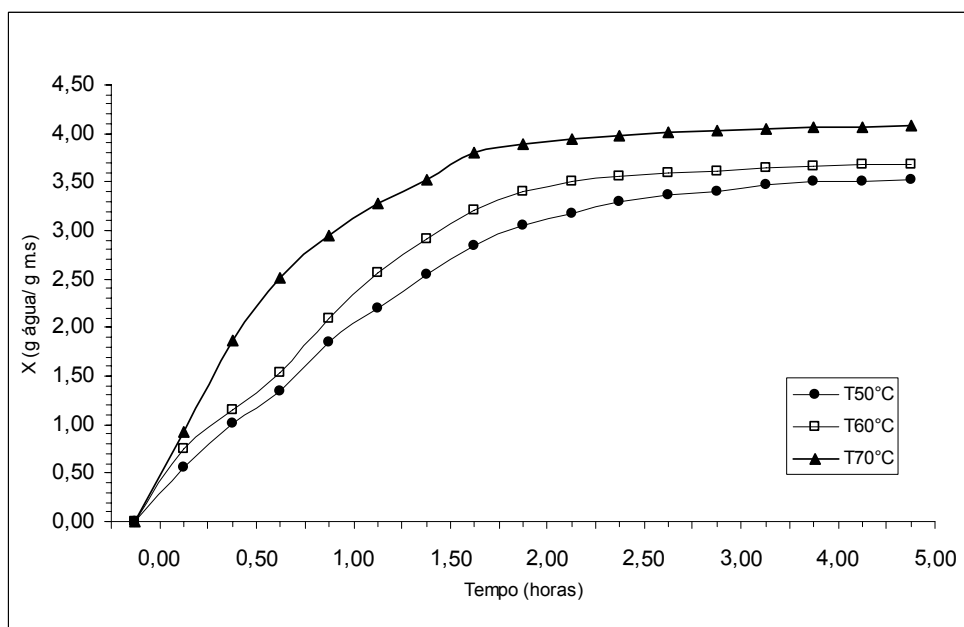


FIGURA 5.8 – GRÁFICO DA SECAGEM OSMO-CONVECTIVA DA YACON COM TEMPERATURA, ESPESSURA E CONCENTRAÇÃO DE 30°C, 5 mm E 50 °BRIX



As Figuras 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12 mostram a taxa de secagem em função da umidade em base seca para as várias combinações de condições de pré-tratamento osmótico e temperatura do ar de secagem. As curvas de taxa de secagem apresentaram comportamento diferenciado frente às diversas condições de

processo. Pode-se observar na Figura 5.9 que a taxa de secagem foi maior, nos primeiros 15 minutos. Para a temperatura de 70°C a velocidade de retirada de água é maior até tender praticamente a zero. A Figura 5.10 representa as fatias pré-tratadas com concentração de 50°Brix. Pode-se observar o menor valor da taxa de secagem nos primeiros 15 minutos quando comparados com a Figura 5.9. A taxa de secagem foi menor para a temperatura de 70°C.

FIGURA 5.9 – TAXA DE SECAGEM OSMO-CONVECTIVA DA YACON COM TEMPERATURA, ESPESSURA E CONCENTRAÇÃO DE 30°C, 2 mm E 30 °BRIX

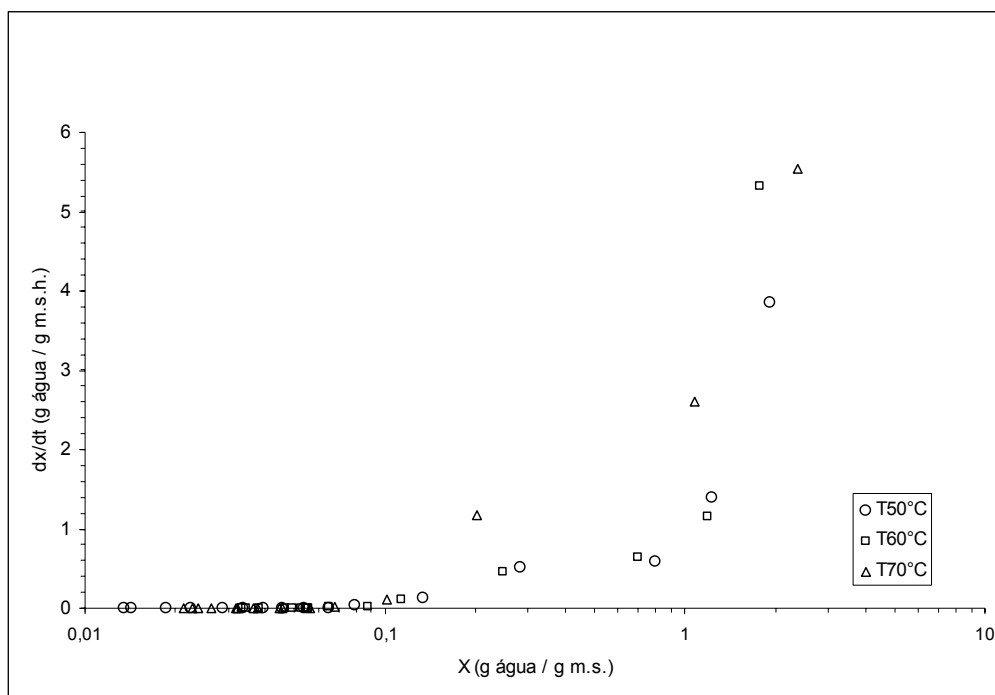
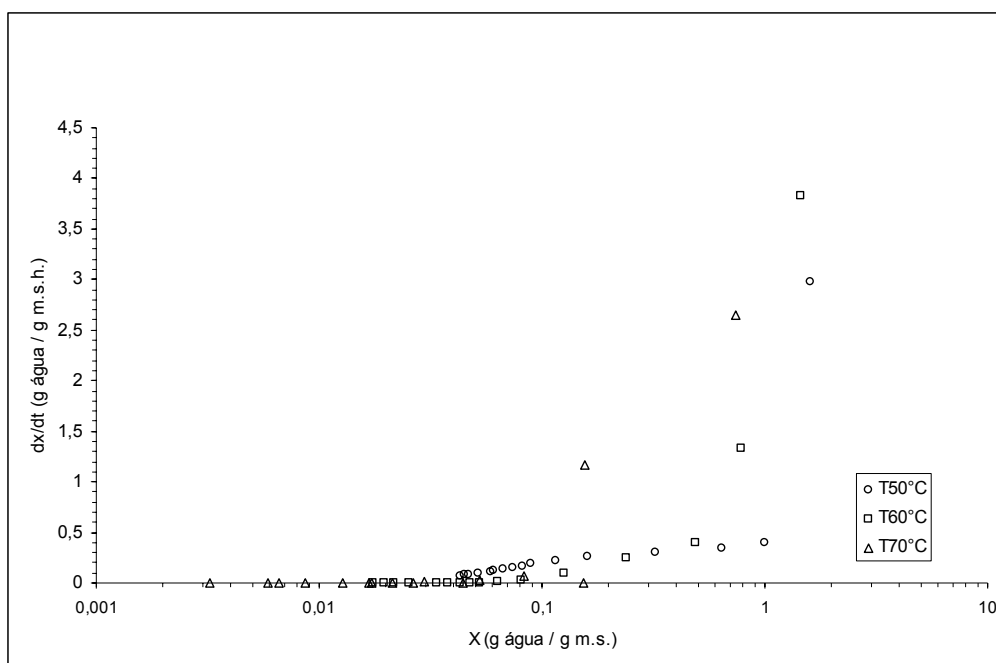


FIGURA 5.10 – TAXA DE SECAGEM OSMO-CONVECTIVA DA YACON COM TEMPERATURA, ESPESSURA E CONCENTRAÇÃO DE 30°C, 2 mm E 50°BRIX



Pelos valores da taxa de secagem nas Figuras 5.11 e 5.12 pode-se observar que o aumento da concentração da solução osmótica no pré-tratamento exerce influência na velocidade de retirada de água das fatias do yacon. O pré-tratamento a 50 °Brix resulta em um maior ganho de sólido nas fatias e, portanto um maior resistência à retirada de água durante a secagem convectiva. A temperatura do ar a 70°C não aumenta a velocidade de secagem e nem a retirada de água da fatias. Este fato também pode ser explicado pelo aquecimento da superfície do alimento e consequente enrigecimento, o qual diminui a difusividade da água (TORREGGIANI, 1993).

FIGURA 5.11 – TAXA DE SECAGEM OSMO-CONVECTIVA DA YACON COM TEMPERATURA, ESPESSURA E CONCENTRAÇÃO DE 30°C, 5 mm E 30°BRIX

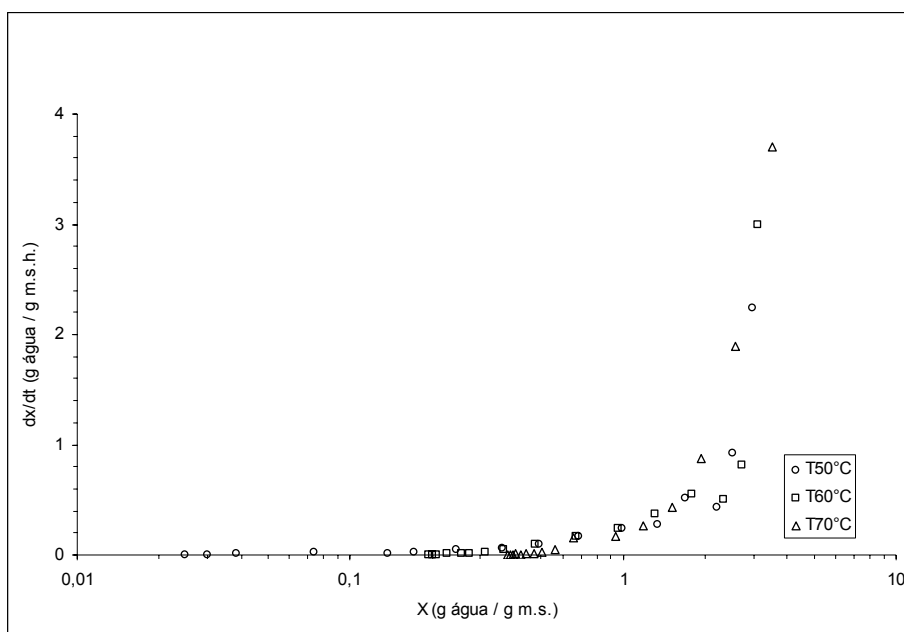
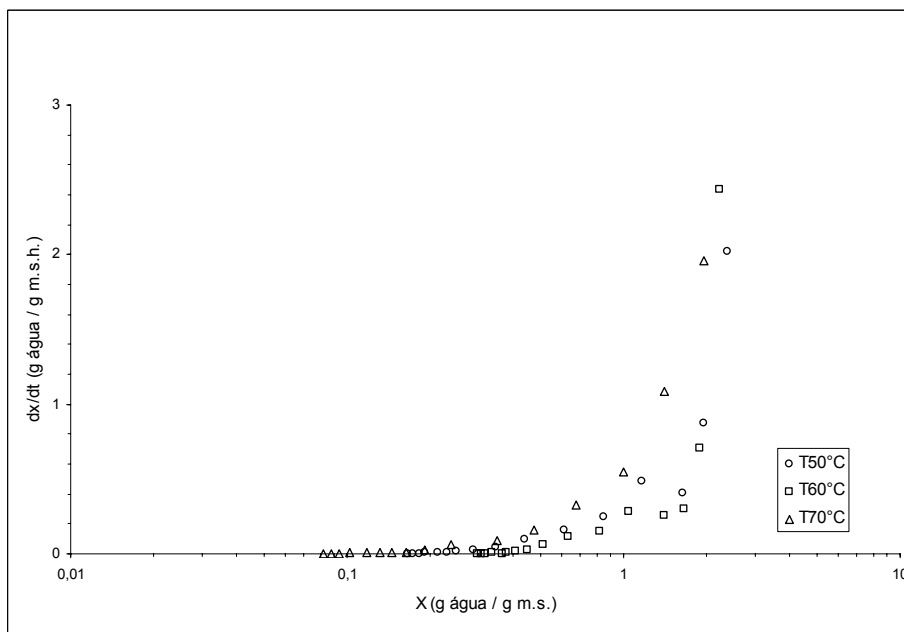


FIGURA 5.12 – TAXA DE SECAGEM OSMO-CONVECTIVA DA YACON COM TEMPERATURA, ESPESSURA E CONCENTRAÇÃO DE 30°C, 5 mm E 50°BRIX



Na Figura 5.13, secagem sem pré-tratamento osmótico, pode-se observar que a temperatura do ar de 50°C não foi efetiva na retirada de água. A temperatura do ar a 60°C foi mais eficiente na retirada de água e no menor tempo de secagem que a 70°C. A curva a 60°C alcançou a tendência ao equilíbrio em 2,5 horas de

secagem enquanto nas fatias pré-tratadas osmoticamente a tendência ao equilíbrio foi alcançada em 1,75 horas a 60°C e 70°C.

O tempo de 5 horas de secagem nas fatias sem pré-tratamento osmótico com 5 mm de espessura não foi suficiente para alcançar a tendência ao equilíbrio em nenhuma das temperaturas estudadas. O ar a 70°C retirou uma maior quantidade de água até 3 horas de processo. Após este período não houve diferença entre as temperaturas estudadas na retirada de água.

FIGURA 5.13 – CURVA DE SECAGEM CONVECTIVA DAS FATIAS DE YACON COM 2mm DE ESPESSURA SEM PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO

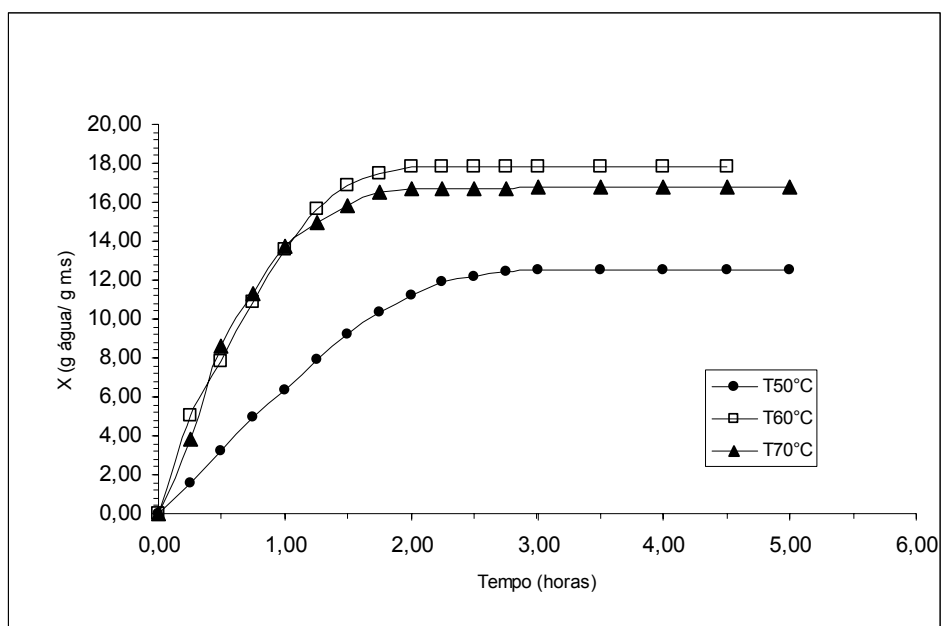


FIGURA 5.14 – CURVA DE SECAGEM CONVECTIVA DAS FATIAS DE YACON COM 5mm DE ESPESSURA SEM PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO

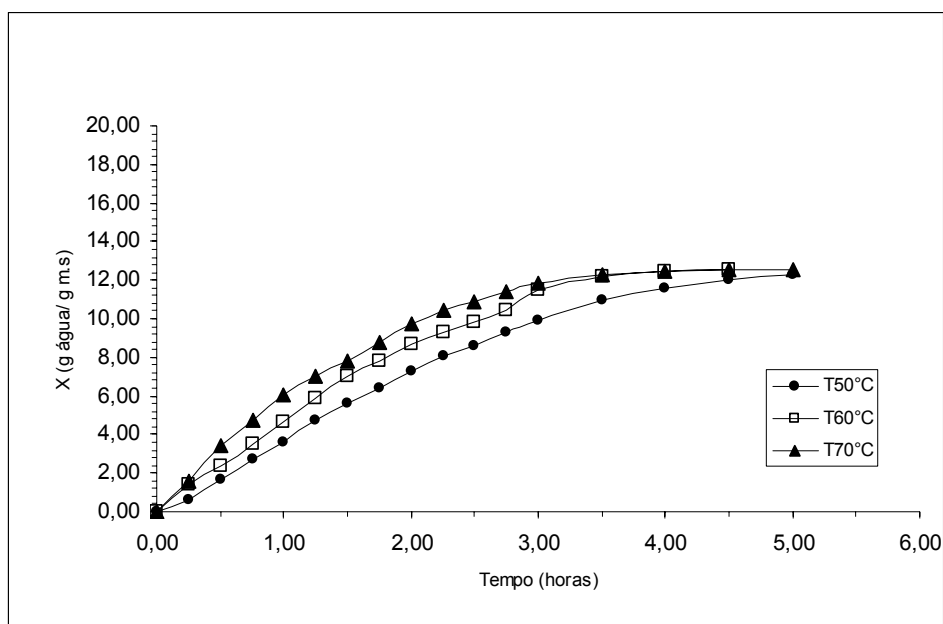
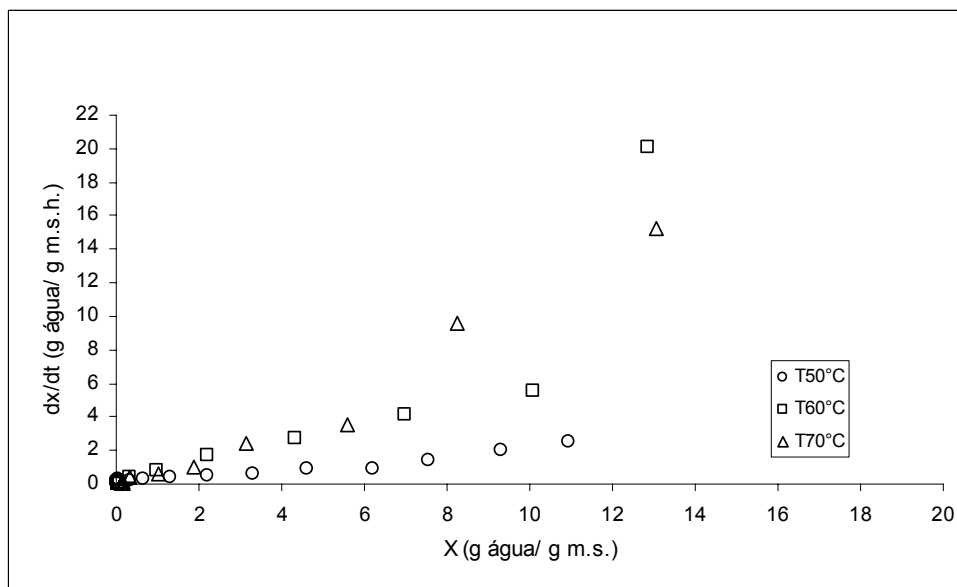
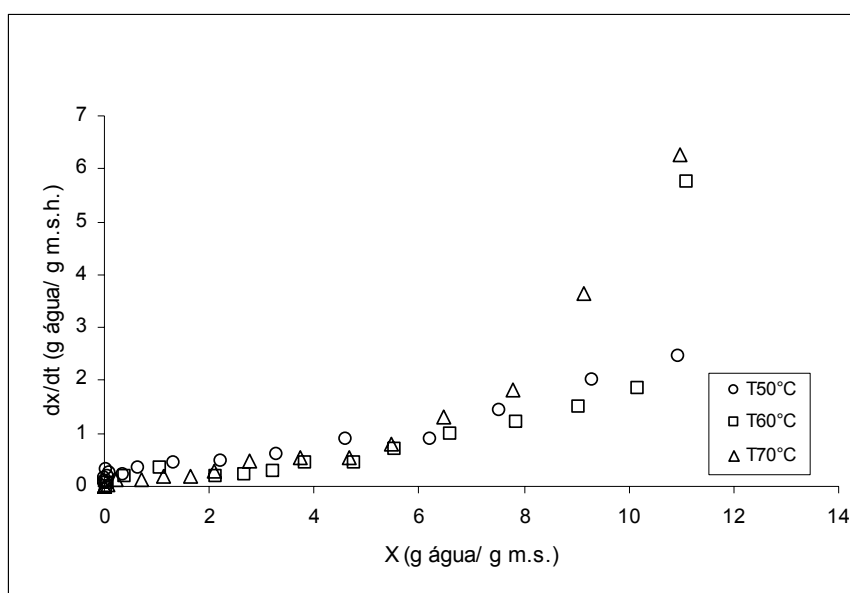


FIGURA 5.15 – TAXA DE SECAGEM CONVECTIVA DAS FATIAS DE YACON DE 2mm DE ESPESSURA SEM PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO



A taxa da secagem convectiva da yacon “in natura”, conforme Figura 5.15 e 5.16, foi maior do que para a taxa da secagem osmo-convectiva. EL-AOUAR (2001), para um mesmo intervalo de umidade encontrou um valor da taxa de secagem para a fruta “in natura” maior do que para o mamão desidratado osmoticamente.

FIGURA 5.16 – TAXA DE SECAGEM CONVECTIVA DAS FATIAS DE YACON DE 5mm DE ESPESSURA SEM PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO



Observando-se visualmente e comparando-se o produto final com e sem pré-tratamento osmótico o pré-tratamento demonstrou exercer influência positiva no produto final, onde a cor, a estrutura e texturas das fatias foram melhores Figura 5.17. MOURA et al. (2003), verificaram a diferença significativa do pré-tratamento quando mediram a variação da cor e do encolhimento das fatias de 3mm de espessura do yacon com e sem pré-tratamento na secagem convectiva.



FIGURA 5.17 - FOTOS DA YACON IN NATURE, COM E SEM PRÉ-TRATAMENTO NAS CONDIÇÕES DE 30 °C, 3 mm, 50 °Brix DE PRÉ-TRATAMENTO E 50 °C NA SECAGEM CONVECTIVA



(a) In natura



(b) Sem e com pré-tratamento



(c) Sem pré-tratamento



(d) Com pré-tratamento

## 5.5 CONCLUSÃO

Das condições estudadas de pré-tratamento osmótico a de 30°C, 5mm e 50°Brix foi a mais efetiva na retirada de água e no menor ganho de sólidos totais. A temperatura de 70°C não foi eficiente na retirada de água das fatias do yacon pré-tratadas com concentração da solução osmótica de 50 °Brix para as espessuras de 2 mm e 5 mm. No pré-tratamento com concentração da solução de 30°Brix a temperatura de 70°C diminuiu o tempo de secagem e retirou maior teor de água.

O tempo de secagem convectiva foi menor para as fatias pré-tratadas osmoticamente. As fatias com espessura de 5 mm sem pré-tratamento osmótico não alcançaram a tendência ao equilíbrio ao final de 5 horas de secagem convectiva enquanto que as pré-tratadas ao final de 3,5 horas apresentaram tendência ao equilíbrio de umidade.

## 6. REDES NEURONAIS

### 6.1 INTRODUÇÃO

A mais recente área de pesquisa em aplicação de novas técnicas de modelagem e simulação de processos é a de redes neuronais artificiais. Com a diminuição do custo de computação e aumento do poder de cálculo dos microcomputadores as redes neurais tem sido alvo de um grande esforço no sentido de dominar a técnica e estabelecer procedimentos de uso.

As redes neuronais são estruturas matemáticas baseadas no funcionamento do cérebro humano, numa tentativa de imitar a inteligência. Formada por unidades básicas, os neurônios, a estrutura neural procura copiar a forma de ligação de um neurônio com outro cérebro. É uma estrutura matemática capaz de aprender através de experiências passadas, ou seja, adaptativo o qual não necessita de conhecimento primário relacionado com o processo tecnológico em questão (YAMAMOTO, 1998; EERIKAINEN et al., 1993).

Uma característica dos processos em engenharia de alimentos é que a maioria apresenta fortes não-linearidades que dificultam bastante a obtenção de modelos fenomenológicos, a ponto de em alguns casos conseguir-se apenas um modelo extremamente simplificado de validade em condições específicas. É exatamente neste nicho que as redes neuronais surgem como uma técnica interessante de ser empregada devido à sua característica de “aprender”. Entretanto, o sucesso da modelagem e controle de processos via rede neuronal depende fortemente do conhecimento das principais variáveis do processo, além de se ter uma base de dados de boa qualidade no domínio desejado (YAMAMOTO, 1998; EERIKAINEN et al., 1993).

Embora existam muitos tipos de redes neuronais, a rede mais empregada na tecnologia e engenharia de alimentos é a multicamadas *Feedforward*, cuja informação segue uma única direção. Redes *Feedforward* possuem características de modelarem bem os processos estacionários possuindo boa estabilidade e relativa simplicidade enquanto que redes recorrentes são melhores para modelar processos dinâmicos (GONTARSKI, 2000; YAMAMOTO, 1998).

As etapas para o desenvolvimento de um modelo de rede neuronal podem ser descritas como: análise do processo e construção da base de dados; configuração de uma estrutura de rede neuronal, treinamento ou aprendizado da rede e validação, com intuito de verificar a eficiência da rede com a apresentação de novos dados experimentais.

A metodologia para a fase de treinamento das redes neurais é conhecida como método de retropropagação (“algoritmo *Backpropagation*”).

## 6.2 OBJETIVO

A proposta deste estudo foi treinar uma arquitetura de rede neuronal para prever e otimizar as características do processo de secagem osmo-convectiva. Para isso estudou-se:

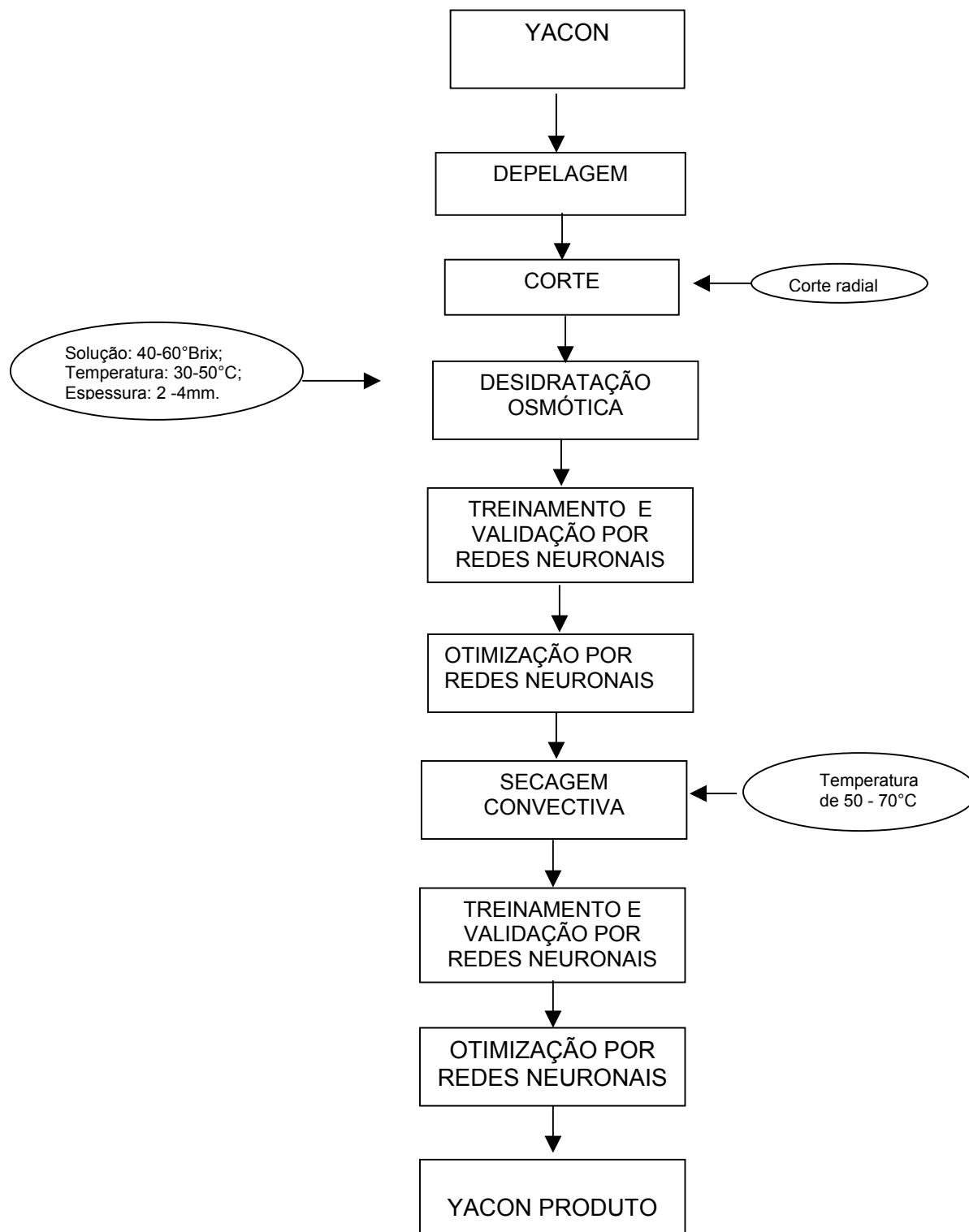
- a influência das variáveis independentes, espessura das fatias de yacon, temperatura e concentração da solução na maior redução do peso e menor ganho de sólidos;
- treinar duas arquiteturas diferentes, sendo uma com o objetivo de minimizar o ganho de sólidos nas fatias de yacon e outra arquitetura para maximizar a sua redução de peso;
- treinar uma rede para a secagem osmo-convectiva com o objetivo de prever a melhor temperatura necessária para minimizar o tempo de secagem;
- otimizar o processo de pré-tratamento osmótico a partir do domínio estudado.

## 6.3 MATERIAL E MÉTODOS

Para a aplicação do modelo de redes neurais no processo de secagem osmo-convectivo foram testadas condições para o pré-tratamento osmótico e secagem convectiva. No pré-tratamento os dados foram coletados e aplicados para o treinamento e validação (dados de teste) pelo modelo de redes neurais e com posterior otimização. A partir das condições de pré-tratamento osmótico geradas pelo modelo foram testadas novas condições de pré-tratamento para posterior

secagem convectiva. Na secagem foram testadas diferentes temperaturas do secador. Na Figura 6.1 apresentam-se as etapas de desenvolvimento do estudo para a obtenção do yacon desidratado.

FIGURA 6.1 - ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO PARA OBTENÇÃO DE YACON DESIDRATADA



### 6.3.1 Análise de dados

Para a aplicação dos dados em redes neurais aplicou-se testes de repetibilidade aos processos de desidratação osmótica e secagem convectiva. A repetibilidade pode ser expressa quantitativamente em termos de características de dispersão das indicações, ou seja, se os resultados de medição se repetem consideravelmente podemos concluir que o instrumento possui uma alta repetibilidade e a mesma não está afetando de forma significativa na medição. CÔCCO (2003), para a previsão das propriedades da gasolina utilizando a técnica das redes neurais, a partir da composição química da gasolina, determinou a dispersão das medidas dos constituintes através do teste de repetibilidade.

Análise foi realizada por desvio padrão experimental onde, para uma série de “n” medições de uma mesma grandeza, o parâmetro “s” (desvio padrão), Equação 6.1, que caracteriza a dispersão dos resultados é dado pela equação:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (6.1)$$

$x_i$  é o resultado da medição de ordem  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ .

$\bar{x}$  é a média aritmética dos “n” resultados considerados.

A expressão “ $s/\sqrt{n}$ ” fornece uma estimativa do desvio padrão da média aritmética  $\bar{x}$  em relação à média “n” da população global sendo denominada “desvio padrão experimental da média” ou erro padrão. A partir deste valor calcula-se o intervalo de confiança ao nível de 95% (MENDENHALL, 1973) e a variação em termos percentuais deste intervalo de confiança.

A distribuição *t-student* foi utilizada para o cálculo do intervalo de confiança, Equação 6.2:

$$\text{intervalo} = \pm t_{\alpha/2} s n^{-1/2} \quad (6.2)$$

onde:

$t_{\alpha/2}$  = parâmetro estatístico tirado de tabelas para distribuição *t-student* (MARTINS & FONSECA, 1994).

Com  $t_{\alpha/2} = 0,025$  (nível de significância de 95%) e  $n - 1$  graus de liberdade retira-se os valores de  $t_{\alpha/2}$  para cada  $n$  (número de medições). Para um intervalo de confiança ao nível de 95%,

$t_{\alpha/2}$  para 8 medições = 2,365

$t_{\alpha/2}$  para 5 observações = 2,776

Para o cálculo da variação percentual em torno da média:

$$\text{Variação} = \left( \frac{\text{intervalo} \cdot 100}{x} \right) \quad (6.3)$$

### 6.3.2 Programa de rede neuronal

O programa computacional de redes neuronais múltiplas camadas, *Feedforward*, com o algoritmo *Backpropagation*, foi desenvolvido em MATLAB utilizando o *Neural Networks Toolbox*, para se obter os conjuntos de parâmetros para cada rede treinada. Este programa proporciona facilidade na escolha dos melhores parâmetros da rede, tais como o  $\eta$  variável ou fixo, número máximo de iterações, intervalo de normalização, número de neurônios na camada oculta e funções de transferência. Com tanta flexibilidade, o número total de redes testadas para cada conjunto de dados chega aos milhares, obtendo-se a melhor arquitetura que se ajusta aos dados ou o melhor conjunto de parâmetros para cada variável estudada.

O programa utiliza os três tipos de função de transferência, sigmoideal (logsig), tangente hiperbólica (tansig) e linear (purelin), combinando duas a duas (camada oculta e de saída) para a otimização da arquitetura.

### 6.3.3 Predição das condições do pré-tratamento osmótico e secagem convectiva

#### 6.3.3.1 Pré-tratamento osmótico

Para a predição das condições de pré-tratamento osmótico via redes neurais foi utilizado como base um delineamento experimental composto central, com 2 repetições do ponto central como mostra a Tabela 6.1. O valor dos níveis do delineamento são apresentados na Tabela 6.2. Outras condições de pré-tratamento também foram inseridas na rede neuronal mas, não ultrapassaram o limite das variáveis do delineamento composto central. As variáveis independentes de entrada foram a espessura das fatias de yacon, a temperatura e a concentração da solução osmótica. As variáveis dependentes de saída foram o ganho de sólidos e a perda de água depois de 2 horas de pré-tratamento osmótico. Para cada variável dependente foi montada uma arquitetura de rede diferente. A metodologia do pré-tratamento encontra-se descrito no Capítulo 4 no item 4.3.2.

TABELA 6.1 – GANHO DE SÓLIDOS E REDUÇÃO DE PESO DE ACORDO COM O DELINEAMENTO EXPERIMENTAL COM PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO DO YACON

Nº do ensaio	VARIÁVEIS INDEPENDENTES			DEPENDENTES	
	Espessura (2 a 4mm)	Temperatura (30 a 50°C)	Concentração (40 a 60°B)	WR (g/gi m.s.)	SG (g m.s./gi m.s)
1	-1	-1	-1	7,46 (0,26)	1,00 (0,19)
2	-1	-1	1	7,98 (0,41)	1,15 (0,07)
3	-1	1	-1	5,19 (0,55)	2,05 (0,23)
4	-1	1	1	6,4 (0,2)	2,65 (0,05)
5	1	-1	-1	7,67 (0,11)	0,49 (0,08)
6	1	-1	1	7,84 (0,4)	0,52 (0,03)
7	1	1	-1	6,31 (0,84)	1,63 (0,35)
8	1	1	1	7,21(0,5)	2,14 (0,46)
9	-1,68	0	0	5,63 (0,38)	1,83 (0,33)
10	1,68	0	0	7,43 (0,14)	1,03 (0,07)
11	0	-1,68	0	3,41 (0,56)	1,14 (0,17)
12	0	1,68	0	6,49 (0,11)	1,56 (0,07)
13	0	0	-1,68	6,9 (0,45)	0,86 (0,14)
14	0	0	1,68	7,19 (0,63)	1,88 (0,22)
15*	0	0	0	7,54 (0,2)	1,54 (0,15)
16*	0	0	0	7,35 (0,37)	1,5 (0,25)
17*	0	0	0	7,44(0,34)	1,51(0,02)

\* Ponto central do delineamento  
Desvio da média entre parênteses



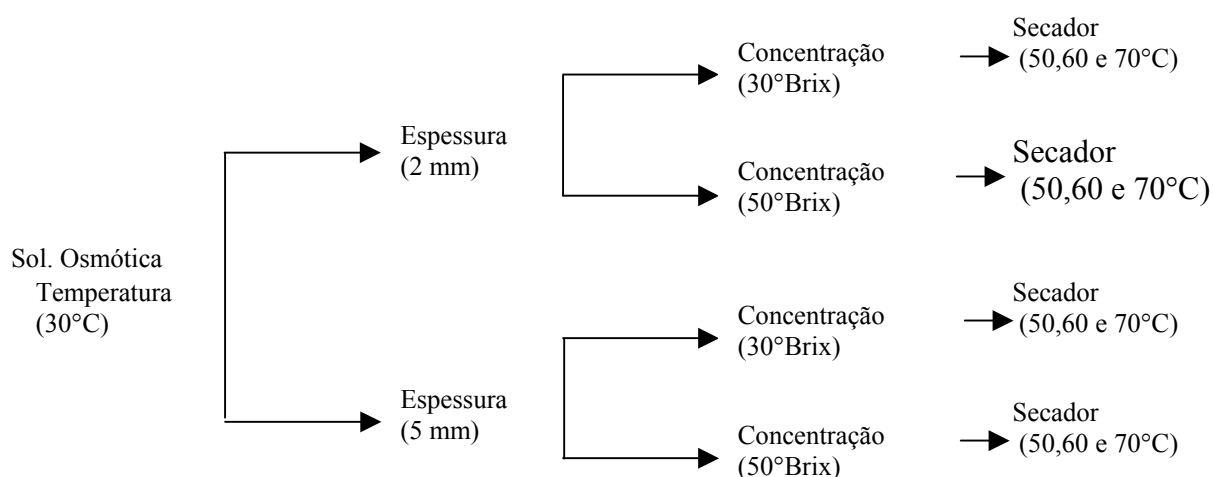
TABELA 6.2 - IDENTIFICAÇÃO DOS NÍVEIS

NÍVEL	ESPESSURA (mm)	TEMPERATURA (°C)	CONCENTRAÇÃO (°Brix)
1,68	4,7	56,8	66,8
1	4	50	60
0	3	40	50
-1	2	30	40
-1,68	1,32	23,18	33,2

### 6.3.3.2 Secagem Convectiva

Para o processo de secagem da yacon com pré-tratamento osmótico, foi utilizado um secador convectivo horizontal estático de bandejas, com vazão média do ar de secagem  $18 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  e temperaturas de 50, 60 e  $70^\circ\text{C}$ , conforme citado no item 5.3.2 do Capítulo 5. Para um domínio mais abrangente do conjunto de entradas e saídas a serem apresentados para a rede, foram determinadas condições de pré-tratamento que resultassem em valores diferentes de umidade e de peso seco total da yacon pré-tratada. As condições estudadas são mostradas no esquema da Figura 6.2 (Capítulo 5).

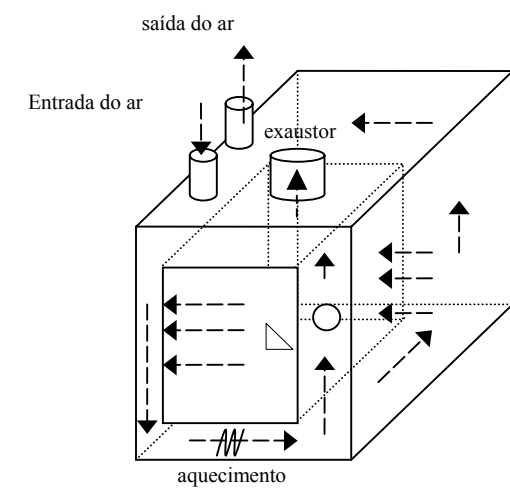
FIGURA 6.2 – ESQUEMA DAS CONDIÇÕES DO PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO UTILIZADO PARA A SECAGEM CONVECTIVA



Todas as amostras de yacon com pré-tratamento osmótico nas condições descritas na Figura 6.3 foram levadas à estufa convectiva a temperaturas de 50, 60 e  $70^\circ\text{C}$ . A variação do peso das fatias foram medidas em intervalos de 15 minutos

nas primeiras 3 horas de secagem e em intervalos de 30 minutos até completar 5 horas totais de processo.

FIGURA 6.3 – ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO SECADOR CONVECTIVO



#### 6.3.4 Otimização das condições do pré-tratamento osmótico e da secagem convectiva

Com os melhores parâmetros da rede neuronal determinados, na etapa de treinamento, foi feita a otimização do processo. O processo de otimização foi realizado pela busca exaustiva dos valores máximos e mínimos da variável dependente, a partir do domínio do conjunto estipulado para cada variável independente. Portanto, a partir dos melhores pesos das funções da camada oculta e de saída, treinados, o programa fornece os valores máximos e mínimos da variável dependente (resposta).

Para determinar-se o desvio relativo entre os pontos calculados experimentalmente e os preditos pela rede neuronal utilizou-se a Equação 6.4:

$$Desvio\ relativo = \frac{(ponto\ experimental - ponto\ calculado)}{ponto\ experimental} \times 100 \quad (6.4)$$

## 6.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.4.1 Tratamento estatístico

Para ter uma noção do erro experimental inserido no pré-tratamento osmótico e na secagem convectiva aplicou-se o teste de repetibilidade nestes processos para medir-se a variação da média do erro.

Para a determinação do erro experimental no pré-tratamento osmótico foram realizados testes com 4 condições experimentais. Os problemas encontrados na medição da variável dependente redução de peso e ganho de sólidos foram devido ao processo não ser automatizado, apresentando como variações o fatiamento para as determinadas espessuras e a drenagem do material em papel absorvente para posterior pesagem, conforme a metodologia descrita no item 4.3.2 do Capítulo 4.

TABELA 6.3- DETERMINAÇÃO DA REDUÇÃO DE PESO (WR) DAS FATIAS DE YACON PARA CÁLCULO DO TESTE DE REPETIBILIDADE EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO

Determinação	30°C,30°Brix,2mm	30°C,50°Brix,2mm	30°C,30°Brix,5mm	30°C,50°Brix,5mm
1	5,805	6,765	7,091	7,142
2	5,639	6,639	7,714	7,143
3	6,360	6,515	7,227	6,948
4	6,049	6,253	7,091	6,998
5	5,742	6,225	7,714	7,094
6	5,795	6,219	7,227	6,993
7	6,882	6,171	7,389	7,496
8	6,969	6,189	7,777	7,606

TABELA 6.4 – TESTE DE REPETIBILIDADE PARA CÁLCULO DA INCERTEZA NA DETERMINAÇÃO DA REDUÇÃO DE PESO (WR)

Tratamento	Média	Desvio padrão	Desvio padrão média	Máximo	Mínimo	Intervalo+/-	Variação
30°C,30°Brix,2mm	6,155	5,64	6,97	0,53	0,19	0,16	2,52
30°C,50°Brix,2mm	7,404	6,17	6,76	0,23	0,08	0,07	1,08
30°C,30°Brix,5mm	6,372	7,09	7,78	0,29	0,10	0,09	1,16
30°C,50°Brix,5mm	7,177	6,95	7,61	0,24	0,09	0,07	1,00

TABELA 6.5 - DETERMINAÇÃO DO GANHO DE SÓLIDO (SG) DAS FATIAS DE YACON PARA CALCULO DO TESTE DE REPETIBILIDADE EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO

Determinação	30°C,30°Brix,2mm	30°C,50°Brix,2mm	30°C,30°Brix,5mm	30°C,50°Brix,5mm
1	1,094	0,551	1,489	0,616
2	1,311	0,606	1,289	0,694
3	0,977	0,661	1,273	0,771
4	1,112	0,669	1,489	0,805
5	1,159	0,736	1,289	0,928
6	1,165	0,742	1,273	1,079
7	0,786	0,770	1,833	1,066
8	0,848	0,803	1,530	0,849

TABELA 6.6 – TESTE DE REPETIBILIDADE PARA CÁLCULO DA INCERTEZA NA DETERMINAÇÃO DO GANHO DE SÓLIDOS (SG)

Tratamento	Média	Desvio padrão	Desvio padrão média	Máximo	Mínimo	Intervalo+/-	Variação
30°C,30°Brix,2mm	1,06	0,79	1,31	0,17	0,06	0,05	4,90
30°C,50°Brix,2mm	1,43	0,55	0,80	0,09	0,03	0,03	3,67
30°C,30°Brix,5mm	0,69	1,27	1,83	0,20	0,07	0,06	4,04
30°C,50°Brix,5mm	0,85	0,62	1,08	0,17	0,06	0,05	5,76

As médias da porcentagem de variação do erro para as variáveis ganho de sólidos (SG) e redução de peso (WR) foram 4,59% e 1,44% respectivamente.

O teste de repetitividade para a secagem convectiva foi realizado nas condições de temperatura de 50°C repedindo-se a secagem das fatias de yacon desidratadas osmoticamente nas mesmas condições de espessura, temperatura e concentração da solução osmótica.

TABELA 6.7 – DETERMINAÇÃO PORCENTAGEM DE PESO DAS AMOSTRAS DE YACON EM RELAÇÃO À MASSA NO TEMPO (T=0) EM FUNÇÃO DO TEMPO

Tempo (hr)	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5
0,25	81,33%	77,65%	69,68%	74,01%	79,00%
0,5	66,78%	56,66%	49,69%	58,78%	65,21%
0,75	51,31%	49,69%	42,63%	47,18%	55,01%
2	41,67%	41,71%	37,70%	39,23%	44,00%
3	40,76%	40,97%	37,59%	38,55%	43,20%

TABELA 6.8– TESTE DE REPETIBILIDADE PARA CÁLCULO DA INCERTEZA NA SECAGEM OSMOCONVECTIVA

Tempo (horas)	Média	Desvio padrão	Desvio padrão média	Máximo	Mínimo	Intervalo+/-	Variação
0,25	76,34	4,57	2,04	81,33	69,68	5,67	7,43
0,5	59,38	6,86	3,07	66,78	49,69	8,51	14,33
0,75	49,16	4,63	2,07	55,01	42,63	5,75	11,69
2	40,86	2,44	1,09	44,00	37,7	3,03	7,42
3	39,98	2,40	1,07	43,20	36,9	2,98	7,45

#### 6.4.2 Treinamento da rede neuronal

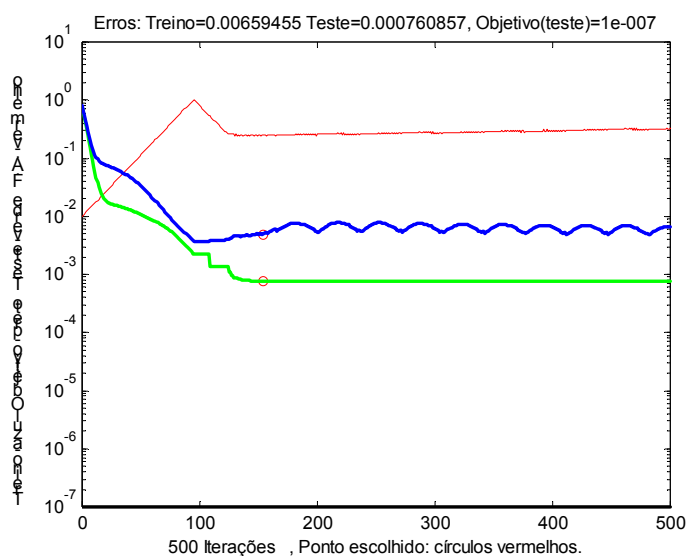
O treinamento das redes neurais foi feito variando-se os seguintes parâmetros nos devidos intervalos:

- numero de interações: 0 a 10.000;
- neurônios na camada oculta: de 2 até 15;
- função transferência da camada oculta: sigmoidal, tangente hiperbólica e linear;
- função de transferência da camada de saída: sigmoidal, tangente hiperbólica e linear;
- faixa de normalização dos dados (entrada de saída): - (0,2 a 0,8) – (0,3 a 0,7) – (0,1 a 0,9);
- fator de amortecimento ( $\eta$ ) variável: 0,01 a 10 com multiplicador incremental e decremental de 5%;

A rede testada possui uma única camada oculta de neurônios. A arquitetura simples possui como vantagem o menor número de parâmetros de redes a serem ajustados (CÔCCO, 2003).

Na Figura 6.4 é apresentado a variação do erro durante o treinamento e teste (validação) do processo de aprendizado da rede neuronal, linha em vermelho representa o fator de amortecimento dinâmico. O fator de parada do aprendizado é o número máximo de interações (10.000) ou quando o conjunto de teste alcança um erro igual ou menor a  $10^{-7}$ . No final do treinamento e validação o programa apresenta as 10 melhores arquiteturas, ou seja as 10 arquiteturas com menor erro de teste ou validação.

FIGURA 6.4 - ILUSTRAÇÃO DA VARIAÇÃO DO ERRO DE TREINAMENTO E TESTE DURANTE O APRENDIZADO DA REDE NEURONAL



#### 6.4.2.1 Pré-tratamento osmótico

No pré-tratamento osmótico foram treinadas duas arquiteturas de redes diferentes para as variáveis dependentes, ganho de sólidos e perda de peso. Na busca da melhor arquitetura que representasse o processo de pré-tratamento osmótico foram testados todos os parâmetros possíveis de serem variados. A forma de apresentação dos dados também foi variada.

##### 6.4.2.1.1 Ganho de sólidos

A princípio treinou-se uma rede com três variáveis de entrada e uma de saída. A entrada era espessura, concentração e temperatura da solução osmótica e como saída o ganho de sólidos era representado em ganho de massa seca pela massa seca inicial (g m.s./gi m.s.). Esta estrutura não conseguiu reproduzir o comportamento experimental. Então, inseriu-se mais uma variável independente na entrada dos dados. Testou-se entrar com os dados conforme a medição durante o processo, massa inicial, em gramas, e a massa final na saída, em gramas, ou seja, os dados não foram normalizados antes de serem inseridos no programa. O erro

relativo de teste melhorou, mas também indicou alguns pontos onde o erro relativo entre os pontos calculados e previstos não melhorava. Os pontos onde não eram ajustados foram repetidos experimentalmente e inseridos para um novo treinamento na rede. O erro relativo melhorou concluindo-se que aqueles pontos continham erros experimentais. Desta forma o programa conseguiu prever com maior eficiência as condições do pré-tratamento osmótico. Com estas variações foi possível determinar uma arquitetura de rede neuronal que representasse o processo de pré-tratamento osmótico para a variável dependente, ganho de sólidos.

A configuração escolhida para representar o processo está representada na Tabela 6.9. No Apêndice 1 é apresentada as figuras geradas pelo programa de redes neurais da melhor configuração escolhida e o banco de dados utilizado.

TABELA 6.9 – PARÂMETROS DA CONFIGURAÇÃO ESCOLHIDA PARA REPRESENTAR O GANHO DE SÓLIDOS DURANTE O PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO

PARAMETROS	VALORES
Número de entrada de dados	4
Número de saídas de dados	1
Número de valores apresentados para treino	42
Número de valores apresentados para teste	19
Número de neurônios na camada oculta	3
Função de transferência na camada oculta	Tangente hiperbólica
Função de transferência na camada de saída	Sigmoidal
Numero de iterações	21
Intervalo de normalização	0,2 a 0,8
Média quadrática do erro dos pontos de treino	0,0005843
Média quadrática do erro dos pontos de teste	0,00098653

FIGURA 6.5 – VALORES OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE E VALORES CALCULADOS PELA REDE COM RELAÇÃO AO GANHO DE SÓLIDOS NA CONDIÇÃO DO PRÉ-TRATAMENTO

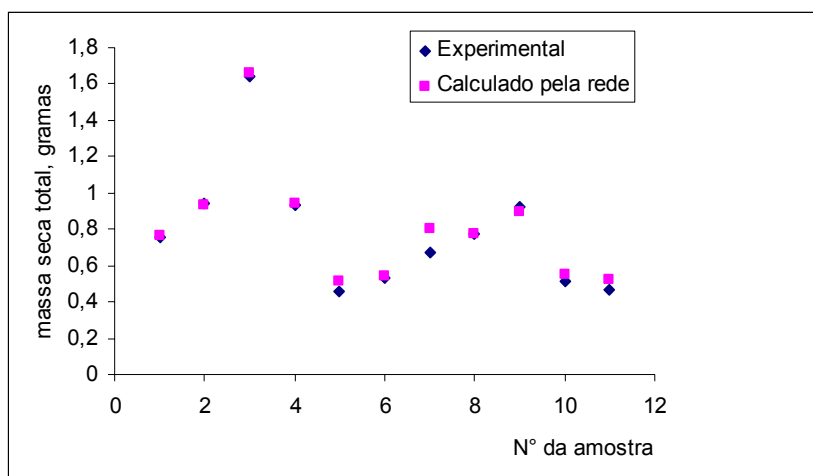
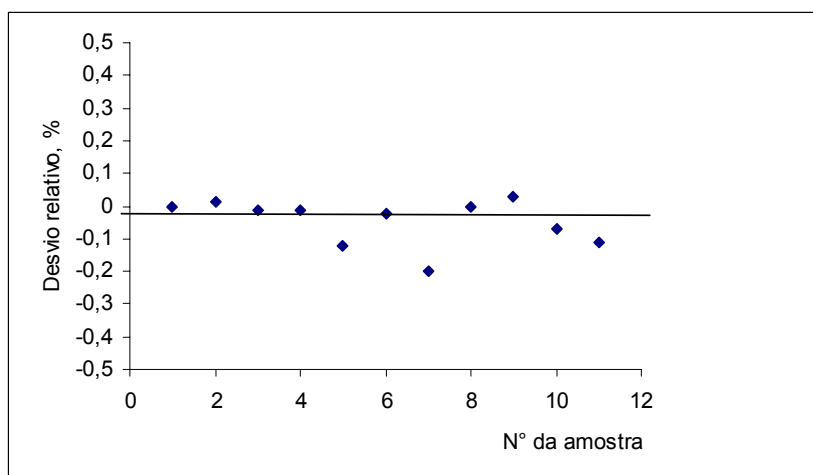


FIGURA 6.6 – DESVIO RELATIVO ENTRE OS VALORES OBTIDOS E OS CALCULADOS PELA REDE NEURONAL PARA O GANHO DE SÓLIDOS





#### 6.4.2.1.2 Redução de peso

A determinação da melhor arquitetura para a variável dependente redução do peso da yacon durante pré-tratamento foi realizada da mesma forma que para a variável ganho de sólidos.

A princípio treinou-se uma rede com três variáveis de entrada e uma de saída. A entrada era composta pela espessura das fatias de yacon, concentração e temperatura da solução osmótica e como saída a redução do peso que era representado em gramas de massa pela massa seca inicial (g / gi.m.s). Como novamente a capacidade preditiva da rede foi pequena, alterou-se os dados conforme a medição durante o processo, em gramas, inserindo-se na entrada a massa inicial e na saída a massa final. Da mesma forma repetiu-se os pontos experimentais que continham um erro relativo grande. O erro relativo de teste melhorou. Com estas variações foi possível determinar uma arquitetura de rede neuronal que representasse o processo de pré-tratamento osmótico com relação a variável dependente redução de peso. A arquitetura escolhida para representar o processo está representada na Tabela 6.10.

TABELA 6.10 – PARAMETROS DA CONFIGURAÇÃO ESCOLHIDA PARA REPRESENTAR A REDUÇÃO DO PESO DURANTE O PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO

PARAMETROS	VALORES
Número de entrada de dados	4
Número de saídas de dados	1
Número de valores apresentados para treino	20
Número de valores apresentados para teste	7
Número de neurônios na camada oculta	7
Função de transferência na camada oculta	Linear
Função de transferência na camada de saída	Sigmoidal
Numero de iterações	78
Intervalo de normalização	0,2 a 0,8
Média quadrática do erro dos pontos de treino	0,0069435
Média quadrática do erro dos pontos de teste	0,00098498

Na Figura 6.7 pode-se verificar que a arquitetura da rede escolhida possui uma boa capacidade preditiva entre os valores. O desvio relativo é mostrado na Figura 6.8.

FIGURA 6.7 – VALORES OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE E VALORES CALCULADOS PELA REDE COM RELAÇÃO À PERDA DE MASSA NA CONDIÇÃO DO PRÉ-TRATAMENTO

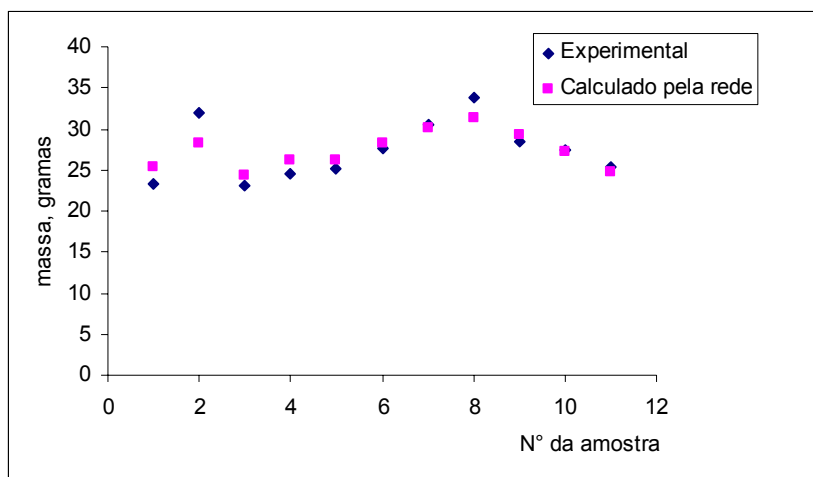
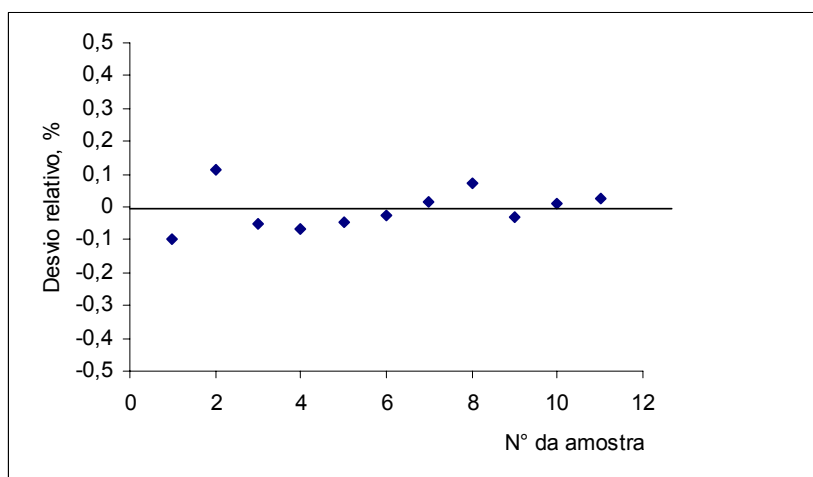


FIGURA 6.8 – DESVIO RELATIVO ENTRE OS VALORES OBTIDOS E OS CALCULADOS PELA REDE NEURONAL



#### 6.4.2.2 Secagem convectiva

Na secagem convectiva as variáveis de entrada foram quatro:

- espessura da fatia;
- temperatura da estufa;
- concentração da solução osmótica no pré-tratamento;
- tempo.

A variável de saída foi representada pela massa, em gramas, que foi medida pelo tempo. A forma de apresentação dos dados de entrada e saída neste treinamento também foi mudada para diminuir o erro entre os pontos experimentais e os calculado pela rede. Primeiro foram apresentados os dados em ordem de cada curva de secagem medida durante a experimentação. Depois, todos os dados foram ordenados em ordem decrescente tanto na entrada dos dados como na saída. Na saída ainda foram testadas as velocidades de secagem, a umidade em base seca com o tempo e os valores sem estarem normalizados. O treinamento não foi bom. A não conseguiu mapear o processo.

Como estava difícil ajustar o erro relativo foi testada uma nova forma de apresentação dos dados. Para montar-se um novo arquivo de treino e teste determinou-se qual o tempo para que o produto atingisse 10% de água (em relação à massa inicial da yacon antes do pré-tratamento osmótico) durante a secagem. A base de 10% de água foi escolhida tendo em vista as exigências da ANVISA (1998) para alimentos desidratados. As novas entradas foram, a espessura das fatias, temperatura do secador, concentração da solução osmótica e a percentagem de massa em relação à massa inicial no começo da secagem convectiva e como saída o tempo. Com isto foi utilizado como conjunto de teste e treinamento os dados em torno de 10% de água na yacon.

Com esta nova forma de apresentação dos dados foi possível melhorar consideravelmente a previsão da rede neuronal. A Tabela 6.11 representa a melhor configuração para a secagem convectiva.

TABELA 6.11 – PARAMETROS DA CONFIGURAÇÃO ESCOLHIDA PARA REPRESENTAR O TEMPO PARA ATINGIR 10% DE UMIDADE DA YACON NA SECAGEM CONVECTIVA

PARAMETROS	VALORES
Número de entrada de dados	4
Número de saídas de dados	1
Número de valores apresentados para treino	21
Número de valores apresentados para teste	15
Número de neurônios na camada oculta	4
Função de transferência na camada oculta	Linear
Função de transferência na camada de saída	Sigmoidal
Numero de iterações	74
Intervalo de normalização	0,2 a 0,8
Média quadrática do erro dos pontos de treino	0,00518744
Média quadrática do erro dos pontos de teste	0,00113926

Novamente a rede apresentou uma boa capacidade preditiva como se pode observar na Figura 6.9 e 6.10.

FIGURA 6.9 – VALORES OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE E VALORES CALCULADOS PELA REDE COM RELAÇÃO AO TEMPO NA SECAGEM CONVECTIVA NA CONDIÇÃO DO PRÉ-TRATAMENTO

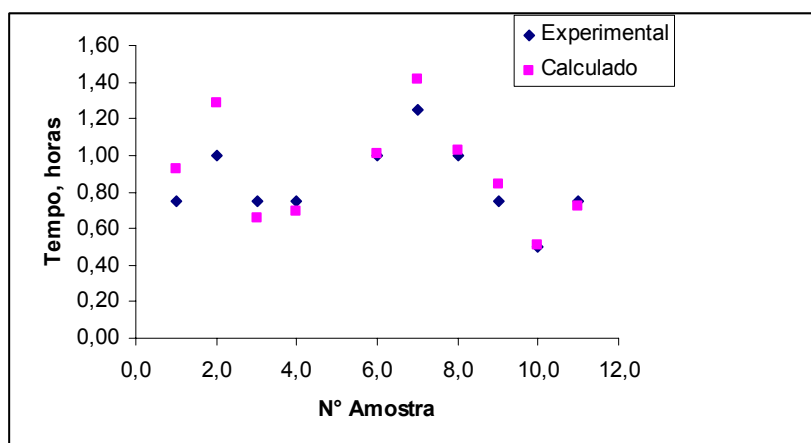
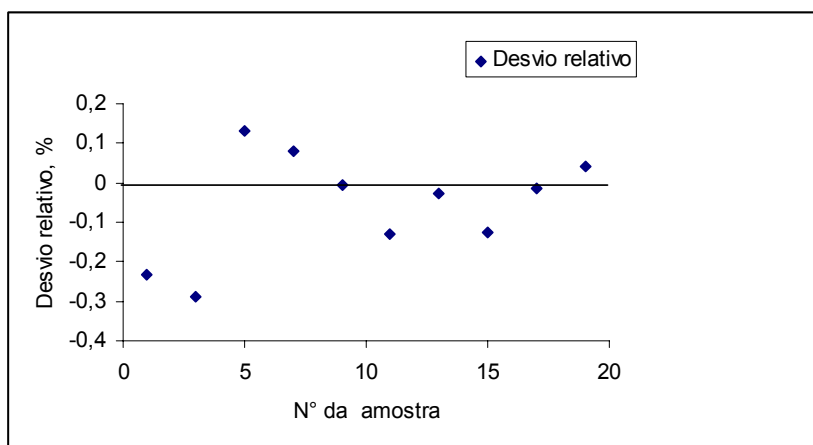


FIGURA 6.10 – DESVIO RELATIVO ENTRE OS VALORES OBTIDOS E OS CALCULADOS PELA REDE NEURONAL COM RELAÇÃO AO TEMPO



### 6.4.3 Otimização do processo

#### 6.4.3.1 Pré-tratamento osmótico

O processo de otimização do pré-tratamento osmótico foi feito com o intuito de buscar a melhor condição dentro do domínio do conjunto estudado, a partir do modelo matemático gerado no treinamento da rede neuronal. O domínio de conjunto foi gerado fornecendo-se a limite inferior do conjunto, o incremento e o limite superior. E, então o programa fornece os valores máximos e mínimos para a variável dependente. É importante salientar que a busca exaustiva das melhores condições do pré-tratamento somente será eficiente se for dentro do domínio, das variáveis dependente, treinada pela rede neuronal. Nas Figuras 6.11 e 6.12 são mostrados respectivamente, os valores calculados na otimização pelos calculados experimentalmente e o desvio relativo médio entre esses valores.

FIGURA 6.11 - PONTO CALCULADO PELO PONTO EXPERIMENTAL PELA REDE TREINADA ESCOLHIDA NA OTIMIZAÇÃO PARA O GANHO DE SÓLIDOS

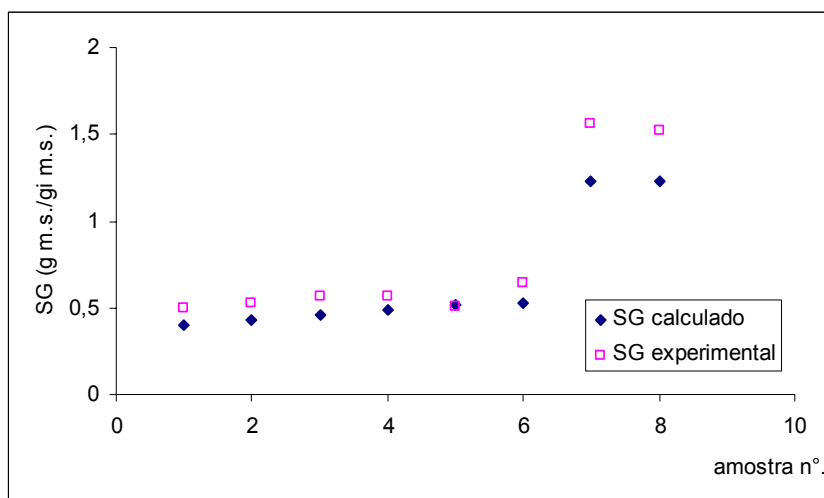
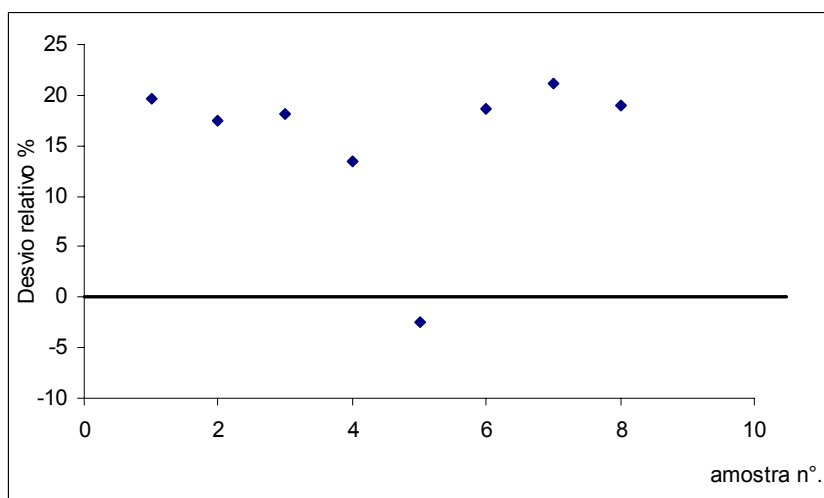


FIGURA 6.12 - DESVIO DE PREVISÃO ENTRE PONTOS CALCULADOS E EXPERIMENTAIS NA OTIMIZAÇÃO PARA O GANHO DE SÓLIDOS



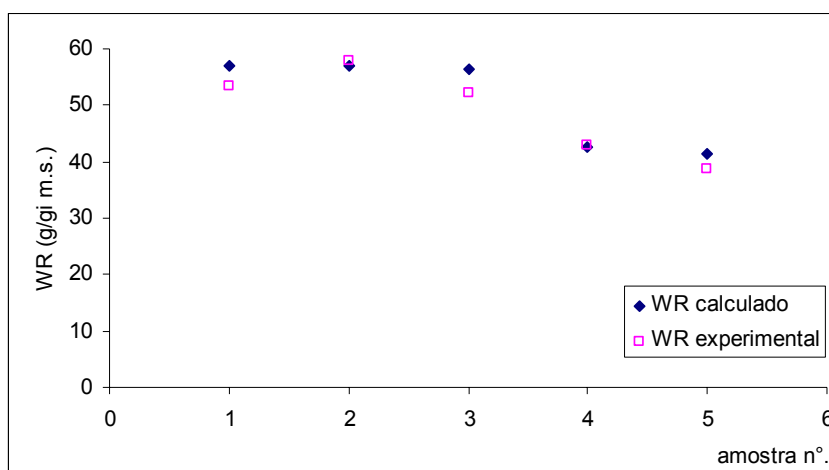
Na Tabela 6.12 mostra-se as 5 melhores condições de pré-tratamento osmótico para o menor e maior ganho de sólidos.

TABELA 6.12 – CONDIÇÕES DE PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO PARA O MAIOR E MENOR GANHO DE SÓLIDOS DA VARIÁVEL DEPENDENTE

MENOR GANHO DE SÓLIDOS			MAIOR GANHO DE SÓLIDOS		
Temperatura (°C)	Espessura (mm)	Concentração (°Brix)	Temperatura (°C)	Espessura (mm)	Concentração (°Brix)
30	5	30	50	3,5	65
30	4,5	30	50	2	60
30	4	30	50	3	65
30	5	35	50	2,5	65
30	3,5	30	50	2	65

Nas Figuras 6.13 e 6.14 são mostrados respectivamente, os valores calculados na otimização e calculados experimentalmente, e o desvio relativo médio entre esses valores.

FIGURA 6.13 - PONTO CALCULADO PELO PONTO EXPERIMENTAL PELA REDE TREINADA ESCOLHIDA PARA A REDUÇÃO DE PESO



Para a variável dependente redução de peso a Tabela 6.13 mostra quais condições de temperatura, espessura e concentração no pré-tratamento osmótico, que geram o menor e maior valor, os valores limites.

FIGURA 6.14 - DESVIO DE PREVISÃO ENTRE PONTOS CALCULADOS E EXPERIMENTAIS PARA A REDUÇÃO DE PESO

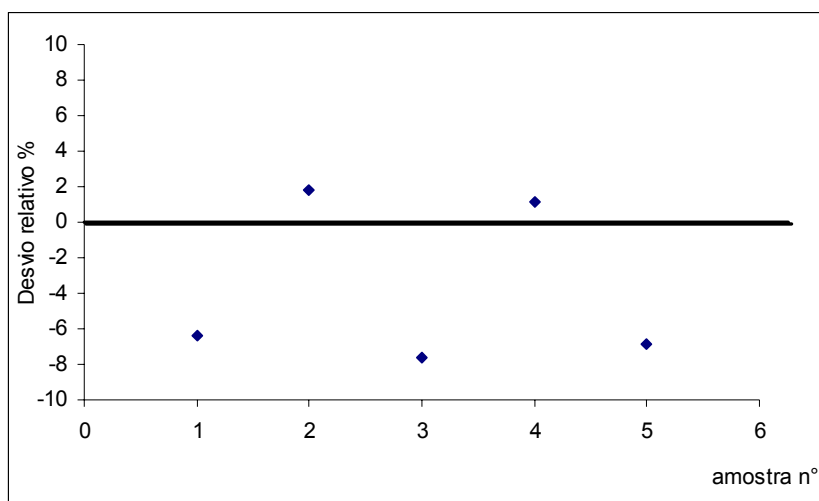


TABELA 6.13 – CONDIÇÕES DE PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICA PARA A MAIOR E MENOR REDUÇÃO DE PESO DA VARIÁVEL DEPENDENTE

MAIOR REDUÇÃO DE PESO			MENOR REDUÇÃO DE PESO		
Temperatura (°C)	Espessura (mm)	Concentração (°Brix)	Temperatura (°C)	Espessura (mm)	Concentração (°Brix)
30	5	65	50	2	40
30	5	60	45	2	30
30	4,5	65	50	2,5	30
35	5	65	50	2	35
30	5	55	50	2	30

#### 6.4.3.2 Secagem Convectiva

A otimização da secagem convectiva foi realizada com o intuito de se verificar a capacidade da rede de prever condições reais. De acordo com a Tabela 6.14 podemos verificar este fato, onde os menores tempos de secagem para alcançar 10% de umidade foram aquele onde o secador convectivo apresentava temperaturas de 70°C e o pré-tratamento osmótico foi em maiores concentrações. O programa apresentou um bom treinamento das condições da secagem convectiva.



TABELA 6.14 – CONDIÇÕES DA SECAGEM CONVECTIVA PARA OBTER O MENOR E MAIOR TEMPO PARA ATINGIR 10% DE UMIDADE EM FUNÇÃO DA MASSA INICIAL

MENOR TEMPO			MAIOR TEMPO		
Temperatura (°C)	Espessura (mm)	Concentração (°Brix)	Temperatura (°C)	Espessura (mm)	Concentração (°Brix)
70	2	50	50	5	50
70	2	45	50	5	45
70	2	40	50	5	40
70	2	35	50	5	35
70	2	30	50	5	30

## 6.5 CONCLUSÃO

A previsão das condições de pré-tratamento osmótico através da técnica de redes neurais foi possível. Obteve-se um bom coeficiente de correlação das variáveis independentes, espessura das fatias, temperatura e concentração da solução.

A otimização das condições de pré-tratamento osmótico foi possível mesmo com o erro experimental potencialmente grande.

Para o menor ganho de sólidos do produto as melhores condições foram 30 °C, 4 - 5 mm e 30 - 35 °Brix.

Para a maior perda de peso da yacon no pré-tratamento as melhores condições foram 30 - 35°C, 4,5 - 5 mm e 55 - 65 °Brix.

A rede apresentou maior capacidade preditiva quando as variáveis independentes e dependentes eram apresentadas à rede com os valores numéricos das determinações experimentais.

Na secagem convectiva as melhores condições para o produto alcançar 10% de água no menor tempo foram 70 °C de temperatura do secador, 2 mm de espessura das fatias e 35-50°Brix de concentração da solução do pré-tratamento osmótico.

## 7. CONCLUSÃO

O tempo de pré-tratamento osmótico determinado que resultou em um menor ganho de sólidos e maior retirada de água foi de uma hora. Mas, para os demais ensaios foi fixado o tempo de pré-tratamento osmótico em 2 horas onde a transferência de massa tendia ao equilíbrio.

As maiores temperaturas na secagem convectiva ajudam a diminuir o tempo para a secagem e melhorar a qualidade do produto, quando pré-tratadas osmoticamente com concentração da solução de 30 °Brix, mas já no pré-tratamento o aumento da temperatura tem influência negativa nas fatias de yacon.

Nas fatias de yacon tratadas osmoticamente observou-se uma melhora na cor, texturas e estrutura do produto depois da secagem.

A menor espessura (2 mm) requer menos tempo para a secagem, mas no pré-tratamento osmótico ocorre um maior ganho de sólidos.

A concentração da solução quando maior possui capacidade de retirar água por pressão osmótica melhor, mas favorece a entrada de sólidos no produto.

O modelo de redes neurais apresentou boa capacidade preditiva durante o treinamento e teste das arquiteturas determinadas. A otimização também foi possível, como verificado na validação experimental das condições geradas pela busca no domínio proposto. O erro gerado pela rede mostrou-se compatível com o erro experimental calculado.

## 8. REFERÊNCIAS

- 1 ALVES, S.M.; SILVEIRA, A.M. Estudo da secagem tomates desidratados e não desidratados osmoticamente. **Revista Universidade Rural, Série ciências exatas e da terra**. v. 21(1) : 21-30, 2002.
- 2 AOAC, Association of Official Analytical Chemistry **Official methods of analysis of AOAC international**. 16.ed. Gaithersburg, v.2, 1997.
- 3 AOAC, Association of Official Analytical Chemistry. **Official methods of analysis of the AOAC Internacional**. 17 ed. Faithersburg, 2000.
- 4 ASAMI, T., M; KUBOTA, M., MINAMISAWA, K.; TSUKIHASHI, T. Chemical composition of yacon, a new root crop from the Andean Highlands. **J. Soil Sci. Plant Nutr.** Jpn. 60:122-126, 1989.
- 5 AZOUBEL, P. M. **Estudo da cinética de desidratação por imersão e secagem de tomate cereja**. Campinas, 1999. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.
- 6 BAUGHMAN, D. R.; LIU, Y. A. **Neural networks in bioprocessing and chemical engineering**.. California: Academic Press, 1995, p.488.
- 7 BOLIN, H. R.; HUXSSOLL, C. C. Effect of osmotic agents and concentration on fruit quality. **Journal Food Science**, v. 48, p. 202-205, 1983.
- 8 BRASIL. Agencia Nacional de Vigilância Sanitária. **Legislação específica de alimentos**. Disponível em <[http://www.anvisa.gov.br/legis/resol/12\\_78\\_frutas\\_secas.htm](http://www.anvisa.gov.br/legis/resol/12_78_frutas_secas.htm)> Acesso em 02 abri 2004.
- 9 CAPITO, S.M.P. Raiz tuberosa de yacon (*Polymnia sonchifolia*): caracterização química e métodos de determinação de frutanos (CG e CLAE-DPA) São Paulo,

2001. 101 f. Dissertação (Mestrado em ciência dos alimentos) – Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Universidade de São Paulo.
- 10 CAPITO, S.M.P.; FILISETTI, T. M. C. C. Composição química do tubérculo de yacon (*Polymnia sonchifolia*) In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS XVII, 2000, Fortaleza. **Anais....** Fortaleza: SBCTA, 2000. p. 5.48.
- 11 CHEN, C.R.; RAMASWAMY, H.S.; ALLI, I. Prediction of quality changes during osmo-convective drying of blueberries using neural network models for process optimization. **Drying Technology**. 19(3&4), p. 507-523, 2001.
- 12 CHUA, K.J.; CHOU, S.K.; MUJUMDAR, A.S.; HO, J.C.; HON, C.K. Radiant-convective drying of osmotic treated agro-products: effect on drying kinetics and product quality. **Food Control**. Article in press, 2003.
- 13 CÔCCO, L. C. **Aplicação de redes neuronais artificiais para previsão de propriedades da gasolina a partir de sua composição química**. Curitiba, 2003. Dissertação (Mestrado em Processos Químicos), Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.
- 14 CONTRERAS, J. E.; SMYRL, T.G. An evaluation of osmotic concentration of apple rings using corn syrup solids solutions. **Canadian Institute of Food Science and Technology**, v.14, p. 310-314, 1981.
- 15 CUBILLOS, F.A.; ALVAREZ, P.I.; PINTO, J.C.; LIMA, E.L. Hybrid-neural modeling for particulate solid drying processes. **Powder Technology**, v. 87, p.153-160, 1996.
- 16 EERIKAINEN, T.; LINKO, P.; LINKO, S.; SIIMES, T.; ZHU, Y-H. Fuzzy logic and neural network applications in food science and technology . **Trends in Food Science & Technology**.v. 41, p.237-242,1993.

- 17 EL-AOUAR, A.A. **Avaliação do processo combinado de desidratação osmótica e secagem na qualidade de cubos de mamão formosa (*Carica papaya L.*)**. Campinas, 2001. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.
- 18 ERBA, M. L.; FORNI, E.; COLONELLO, A., GIANGIACOMO, R. Influence of sugar composition and air dehydration levels on the chemical-physical characteristics of osmodehydrofrozen fruit. **Food Chemistry**, v.50, p.69-73, 1994.
- 19 ERTEKIN, F.K.; CAKALOZ, T. Osmotic dehydration of peas: influence of process variables on mass transfer. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 20, p.87-104, 1996.
- 20 ESPIRITO SANTO, F.R.C.; FLOSS, P.A., BECKER, J. Tecnologias para o cultivo de yacon (*Polymnia sonchifolia*) POEPP & ENDL. na região de Chapecó – SC. In: IV JORNADA CATARINENSE DE PLANTAS MEDICINAIS, Anais..., Itajaí: Universidade do Vale do Itajaí - UNIVALI e Associação Catarinense de Plantas Medicinais - ACPM, set., 2003.
- 21 FALCONE, M. A.; SUAZO, C. T. Desidratação osmótica de abacaxi: I. influência da temperatura e concentração do xarope sobre a velocidade de secagem. **Boletim SBCTA**, Campinas, 22 (/2) : 17-35, 1988.
- 22 FIOREZE, R.; MORINI, B. Yam (*Discorea sp.*) drying with different cuts and temperatures: experimental and simulated results. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, 20 (2): 262-266, maio/ago. 2000.
- 23 FRAGOSO, A. V.; PAZ, H. M. Reuse of sucrose syrup in pilot-scale osmotic dehydration of apple cubes. **Journal of Food Process Engineering** v. 25, n.2, p. 125-140, maio 2002.

- 24 FRANCO, G. Tabela de composição química dos alimentos. 9 ed., Atheneu, São Paulo, 1999.
- 25 GONTARSKI, C. A. U. **Avaliação da utilização de redes neuronais aplicadas a processos químicos**. Campinas, 2000. 158 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química – Faculdade de Engenharia Química. Universidade Estadual de Campinas.
- 26 GRAEFE, S.; HERMANN, M.; MANRIQUE, I.; GOLOMBEK, S.; BUERKERT, A. Effects of post-harvest treatments on the carbohydrate composition of yacon roots in the Peruvian Andes. **Field Crops Research**. Article n press, 2003.
- 27 GRAU, A.; KORTSARZ, A.M.; AYBAR, M.J.; RIERA, A.N.S.; SANCHEZ, S.S. El retorno del yacón. **Revista de Divulgación Científica y Tecnológica de la Asociación Ciencia Hoy**, Buenos Aires, v.11, n. 63, jun/jul 2001.
- 28 GRAU, A.; REA, J. Yacon. *Smallanthus sonchifolius* (Poepp. & Endl.) H. Robinson. In: HERMANN, M. AND J.HELLER. **Andean roots and tubers: Ahipa, arracacha, maca and yacon. Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops**. Rome: IPK, Gatersleben / IPGRI. p. 199-242., 1997.
- 29 HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e práticas**. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. p.900.
- 30 HERMAN, M.; FREIRE, I., PAZOS, C., Compositional diversity of the yacon storage root. In: Impact on a changing world. Program Report. CIP, Lima, p.199-242, 1997-1998.
- 31 IAL, Instituto Adolfo Lutz **Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz**. 3.ed. São Paulo, v.1, 1985.

- 32 INFORME TÉCNICO 95/96 – INSTITUTO NACIONAL AUTÔNOMO DE INVESTIGACIONES AGROPECUÁRIAS. Subprojeto R7-040. Estudo poscosecha de la calidad de raices y tubérculos andinos para definir sus posibles usos y aplicaciones. Quito: INIAP, 1995-1996. p.19-22.
- 33 KARATHANOS, V. T., HOSTAROPOULOS, A. E. Air-drying kinetics of osmotically dehydrate fruits. **Drying Technology**. v.13, n. 5-7, p.1503-1521, 1995.
- 34 KOWALSKA, H.; LENART, A. Mass exchange during osmotic pretreatment of vegetables. **Journal of Food Engineering**, v.49, p.137-140, 2001.
- 35 LAZARIDES, H.N.; KATSANIDIS, E.; NICKOLAIDIS, A. Mass transfer kinetics osmotic preconcentration aiming at minimal solid uptake. **Journal of Food Engineering**. V. 25, p.151-166, 1995.
- 36 LENART, A. Osmo-convective drying of fruits and vegetables: technology and application. **Drying Technology**, v. 14, n.2, p.391-413, 1996.
- 37 LERICI, C. R.; PINNAVAIA, G.; DALLA ROSA, M., BARTOLUCCI, L. Osmotic dehydration of fruit: Influence of osmotic agents on drying behavior and product quality. **Journal of Food technology**, v.18, p.667-685, 1985.
- 38 MACHADO, S.R.; OLIVEIRA, D.M.T., DIP, M.R; MENEZES, N.L. Rizóforos em *Polymnia sonchifolia* (Asteraceae). In: XIII CONGRESSO DA SOCIEDADE BOTÂNICA DE SÃO PAULO, **Anais...**, São Paulo: Instituto de Biociência – USP, 2000.
- 39 MARTINS, G.A.; FONSECA, J.S. **Curso de estatística**. 5 ed. São Paulo, Atlas, 1994.

- 40 MEDEIROS, J. A batata que alimentou os incas. **Revista Globo Rural**, n. 185, mar. 2001. Disponível em:< <http://globorural.globo.com/barra.asp?d=/edic/185/grresponde1a.htm> >Acesso 22 out. 2002.
- 41 MEDENHALL, W.; SCHEAFER, R.L. **Mathematical Statistics with applications**. Massachusetts, Duxbury Press, 1973.
- 42 MITTAL, G.S.; ZHANG J. Artificial neural network-based psychrometric predictor. **Biosystems Engineering**. v.85 n.3, p.283–289, 2003.
- 43 MOURA, C.P.; MASSON, M.L.; YAMAMOTO, C.I. Effect of osmotic pretreatment on convective drying of yacon. In: 12th World Congress of Food Science and Technology. **Oral presentation...**Chicago, jul. 2003.
- 44 NATIONAL RESEARCH COUNCIL **Lost crops of the Incas: little known plants of the Andes whit promise for worldwide cultivation** .. National Academy Press, Washington, D.C., 1989.
- 45 NI, H.; GUNASEKARAN, S. Food Quality Prediction with neural networks. **Food Technology**. v.52, p.60-65, 1998.
- 46 NITSCHKE, M.; UMBELINO, D.C. Frutooligossacarídeos: novos ingredientes funcionais. **Boletim SBCTA**, Campinas, 36(1): 27-34. jan. – jun., 2002.
- 47 NSONZI, F.; RAMASWAMY, H.S. Quality evaluation of osmo-convective dried blueberries. **Drying Technology**. V.16, p.705-723, 1998.
- 48 OHYAMA, T.; ITO, O.; YASUYOSHI, S.; IKARASHI, T.; MINAMISAWA, K.; KUBOTA, M.; TSUKIHASHI, T.; ASAMI, T. Composition of storage carbohydrate in tubers of yacon (*Polymnia sonchifolia*). **J. Soil Sci. Plant Nutr.** Jpn. 36:167-171, 1990.



- 49 PARK, K. J.; BIN, A.; BROD, F. P. R. Obtenção de isothermas de sorção e modelagem matemática para a pêra bartlett (*Pyrus sp.*) com e sem desidratação osmótica. **Ciências e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, 21: 73-77, jan -abr., 2001.
- 50 PHARMA, G. Yacon. Disponível em: <<http://www.ethnohealth.com/eng/yac/yacuso.htm>> Acesso em: 12 abr. 2004.
- 51 PONTING, J. D.; WATTERS, R. R.; FORREY, R.; JACKSON, R.; STANLEY, W. L. Osmotic dehydration of fruit **Food Technology**, v.20, n.10, p.1363-1368, 1966.
- 52 RAOULT-WACK, A. L.; LENART, A.; GUILBERT S. Recent ces in dewatering though immersion in concentraded solutions. In: **Drying of Solids**. ed. A. S. Mujundar. Iternational Science Publishers, New York, p. 211-51, 1992.
- 53 RAOULT-WACK, A.L. **Recent advances in the osmotic dehydration of foods**, Food Science & Tecnology, v. 05, p.255-260, 1994.
- 54 RASTOGI, N.K.; RAGHAVARAO, K.S.M.S.; NIRANJAN, K.; KNORR, D. Recent developments in osmotic dehydration: methods to enhance mass transfer. **Trends in Food Science and Technology**.. V.13, p.48-59, 2002.
- 55 ROMERO, J. T.; GABAS, A. L.; YAMASHITA, F.; TELIS, V. R. N.; MENEGALLI, F. C. **Secagem de produtos alimentícios**, São José do Rio Preto: UNESP, 1997. p. 58.
- 56 SHARMA, S. K.; MULVANEY S. J.; RIZVI, S. H. **Food process engineering: theory and laboratory experiments**. New York: John Wiley & Sons, 2000. p. 348.
- 57 TATIBANA, C. Y.; KAETSU, D. Y. Homepage de redes neuronais. Disponível em <<http://www.din.uem.br/ia/neurais>> Acesso em 2abril 2004.

- 58 TOGRUL, T.I.; PEHLIVAN, D. Modelling of drying of single apricot. **Journal of Food Engineering**. V.58, p.23-32, 2003..
- 59 TORREGGIANI, D. Osmotic dehydration in fruit and vegetable processing. **Food Research Internacional**, v.26, p. 59-68, 1993.
- 60 TREGUNNO, N.B.; GOFF, H.D. Osmodehydrofreezing of apples: structural and textural effects. **Food Research Internacional**, v.29, p. 471-479, 1996.
- 61 TRAVAGLINI, D.A.; AGUIRRE, J.M.; SILVEIRA, E.T.F. Desidratação de frutas In: AGUIRRE, J.M.; GASPARINO FILHO, J. **Desidratação de frutas e hortaliças – manual técnico**. Campinas, ITAL, 1999.
- 62 USP – UNIVERSIDADE ESTADUAL DE SÃO PAULO **Tabela de composição de alimentos**: projeto integrado de composição de alimentos. Disponível em:<<http://www.fcf.usp.br/tabela/tbcmenu.php>> Acesso: em 18 ago. 2002.
- 63 VALE, C.M.; ZAMBIAZI, R.C. Previsão de estabilidade de óleos vegetais através da rede de inteligência artificial, **Ciências e Tecnologia de Alimentos**, v.20 (3), p.342-348, 2000.
- 64 VAN ARSDEL, W. B. Drying phenomena. In: VAN ARSDEL, W. B.; COPLEY, M. J.; MORGAN Jr., A. I. **Food Dehydration**, 2. ed., Westport., AVI publishing Co., v.1, cap.3, p. 22-57, 1973.
- 65 VENTURA, F. C.; GARCÍA, N. H. P.; WADA, J. K. A. Desidratação osmótica de yacon utilizando sorbitol como agente desidratante. In: II Simpósio em Ciências de Alimentos – SIMPOCAL, **Anais...**, Florianópolis, 28-30 maio 2003.
- 66 VIAL, C.; GUILBERT, S.; CUQ, J. L. Osmotic dehydration of kiwi fruits: influence of process variables on the color and ascorbic acid content. **Science des Aliments**, 11 (1): 63-84, 1991.

- 67 VIDEV, K.; TANCHEV, S.; SHARMA, R. C.; JOSHI, V. K. Effect of sugar syrup concentration and temperature on the rate of osmotic dehydration of apples. **Journal of Food Science and Technology**, 27 (5): 307-308, 1990.
- 68 VON-LOESECHE, H. W. **Drying and dehydration of foods**. New York: Reinhold, 1943. p. 302.
- 69 XIE, G.; XIONG, R. Use of hiperbolic and neural networks models in modelling quality changes of dry peas in long time cooking. **Journal of Food Engineering**, v.41, p. 151-162, 1999.
- 70 YAMAMOTO, C. I. **Modelagem matemática e otimização do processo industrial de síntese de amônia utilizando redes neurais**. São Paulo, 1998. 209 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- 71 YANG, D. C. ; LE MAGUER M. Osmotic dehydration of strawberries in a batch recirculation system. **Journal of Food Quality**. 15: 387-397, 1992.
- 72 ZARDINI, E. Ethnobotanical notes on yacon, *Polymnia sonchifolia* (Asteraceae). **Econ. Bot.**, Bronx, v.45, n.1, p.72-85,1991.

APÊNDICE 1 – BANCO DE DADOS E GRÁFICOS GERADOS PELO MODELO DE REDE NEURONAL PARA A VARIÁVEL GANHO DE SÓLIDOS

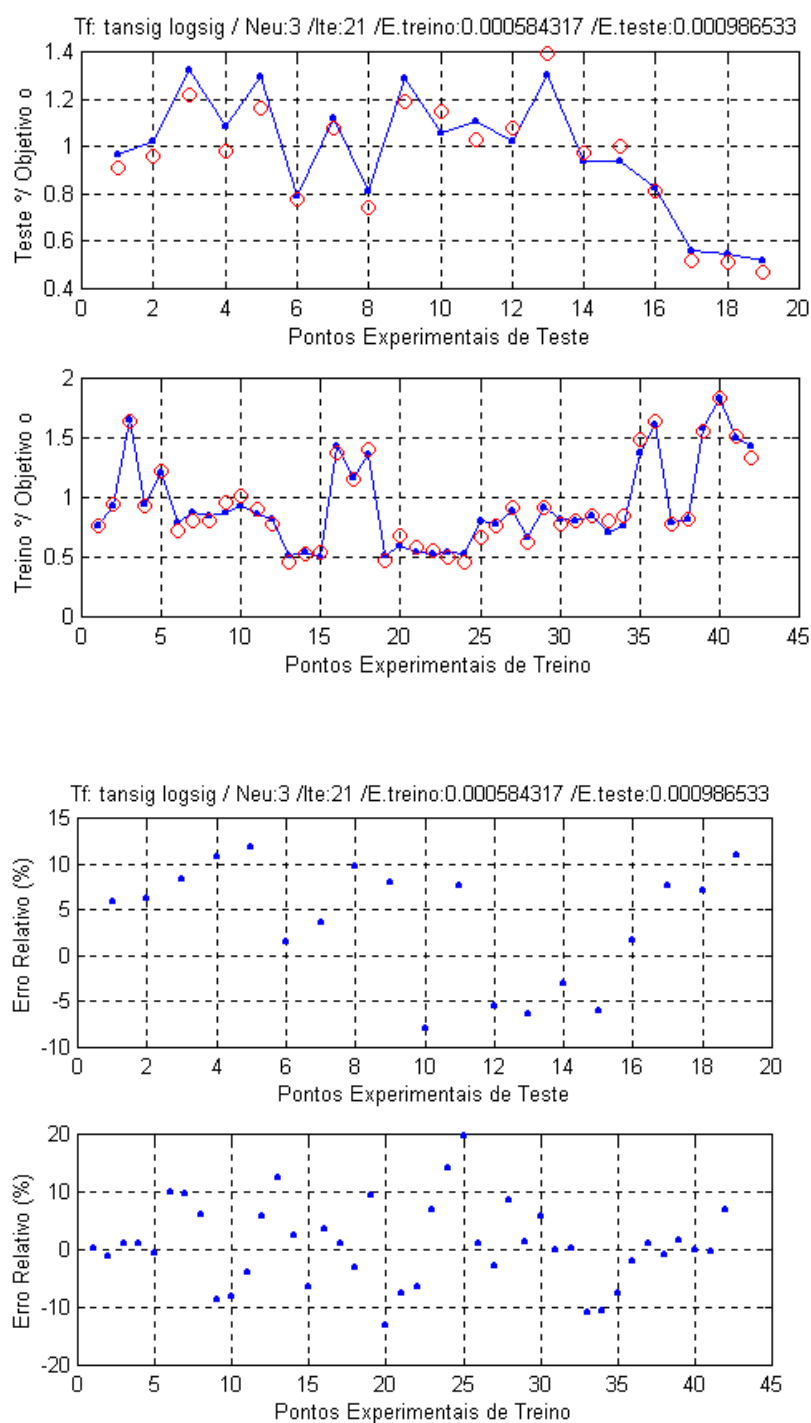
TABELA 1.1 – BANCO DE DADOS DE TREINAMENTO PARA VARIÁVEL DEPENDENTE GANHO DE SÓLIDOS

Dados de entrada				Dados resposta
Temperatura (°C)	Espessura (mm)	Concentração (°Brix)	Massa seca inicial (g)	Massa seca final (g)
30,00	4,00	40,00	0,50	0,76
30,00	4,00	40,00	0,65	0,94
30,00	4,00	40,00	1,03	1,64
30,00	4,00	60,00	0,60	0,93
30,00	4,00	60,00	0,77	1,22
30,00	4,00	60,00	0,47	0,72
30,00	2,00	40,00	0,42	0,80
30,00	2,00	40,00	0,40	0,80
30,00	2,00	40,00	0,42	0,96
30,00	2,00	60,00	0,45	1,02
30,00	2,00	60,00	0,40	0,90
30,00	2,00	60,00	0,37	0,78
40,00	1,34	50,00	0,18	0,46
40,00	1,34	50,00	0,20	0,53
40,00	1,34	50,00	0,17	0,54
40,00	4,70	50,00	0,71	1,38
40,00	4,70	50,00	0,60	1,15
40,00	4,70	50,00	0,68	1,40
40,00	3,00	50,00	0,20	0,47
40,00	3,00	50,00	0,27	0,68
40,00	3,00	50,00	0,23	0,59
40,00	3,00	50,00	0,21	0,56
40,00	3,00	50,00	0,22	0,50
40,00	3,00	50,00	0,21	0,46
50,00	2,00	61,00	0,21	0,67
50,00	2,00	61,00	0,20	0,77
50,00	2,00	40,00	0,31	0,92
50,00	2,00	40,00	0,22	0,62
50,00	2,00	40,00	0,32	0,91
50,00	2,00	48,00	0,26	0,78
50,00	2,00	48,00	0,25	0,80
50,00	2,00	48,00	0,27	0,85
50,00	3,00	48,00	0,25	0,80
50,00	3,00	48,00	0,27	0,85
50,00	3,00	48,00	0,49	1,49
50,00	3,00	61,00	0,53	1,64
50,00	3,00	61,00	0,24	0,78
50,00	3,00	61,00	0,25	0,82
50,00	4,00	60,00	0,56	1,56
50,00	4,00	60,00	0,67	1,84
50,00	4,00	60,00	0,53	1,51
50,00	4,00	40,00	0,57	1,34

TABELA 1.2 – BANCO DE DADOS PARA TESTE OU VALIDAÇÃO DA VARIÁVEL  
DEPENDENTE GANHO DE SÓLIDOS

Dados de entrada				Dados resposta
Temperatura (°C)	Espessura (mm)	Concentração (°Brix)	Massa seca inicial (g)	Massa seca final (g)
50,00	4,00	40,00	0,41	0,91
50,00	4,00	40,00	0,43	0,96
40,0	4,0	58,5	0,61	1,22
40,0	4,0	58,5	0,51	0,98
40,0	4,0	58,5	0,60	1,16
40,0	3,00	33,20	0,50	0,78
40,0	3,00	33,20	0,64	1,08
40,0	3,00	33,20	0,51	0,74
40,0	3,00	50,00	0,62	1,19
40,0	3,00	50,00	0,53	1,15
40,0	3,00	67,00	0,46	1,03
40,0	3,00	67,00	0,42	1,08
40,0	3,00	67,00	0,54	1,39
40,0	3,00	58,50	0,43	0,97
40,0	3,00	58,50	0,43	1,00
40,0	3,00	58,50	0,37	0,81
40,0	2,00	42,50	0,28	0,52
40,0	2,00	42,50	0,27	0,51
40,0	2,00	42,50	0,25	0,47

FIGURA 1.1 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO CONJUNTO TREINADO E VALIDADO PARA A VARIÁVEL DEPENDENTE GANHO DE SÓLIDOS



APÊNDICE 2 – BANCO DE DADOS E GRÁFICOS GERADOS PELO MODELO DE REDE NEURONAL PARA A VARIÁVEL DEPENDENTE REDUÇÃO DE PESO

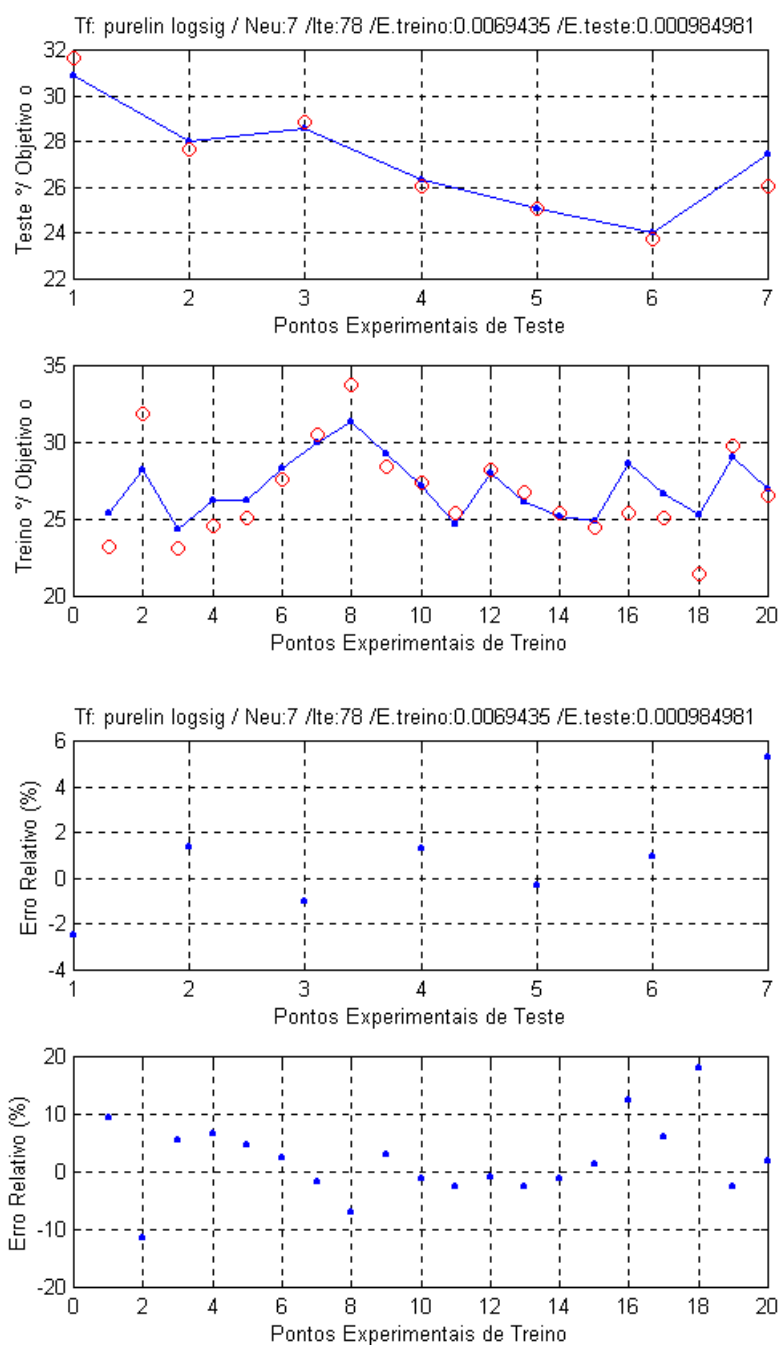
TABELA 2.1 - REPRESENTAÇÃO DO CONJUNTO DE DADOS UTILIZADOS PARA O TREINAMENTO DA VARIÁVEL DEPENDENTE REDUÇÃO

BANCO DE DADOS PARA TREINAMENTO				
Dados de entrada				Dados resposta
Temperatura (°C)	Espessura (mm)	Concentração (°Brix)	Massa total inicial (g)	Massa total final (g)
30	2	60	56,44	23,21
40	1,34	50	53,82	31,86
40	4,7	50	52,61	23,13
40	3	50	53,03	24,58
40	3	50	53,19	25,09
50	2	61	53,45	27,59
50	2	40	52,37	30,54
50	2	48	59,17	33,75
50	3	48	55,60	28,45
50	4	40	49,96	27,44
40	4	58,5	54,11	25,38
40	3	33,2	53,24	28,23
40	3	50	52,64	26,80
40	3	67	54,90	25,42
40	3	58,5	51,40	24,50
40	2	42,5	54,76	25,43
50	3	61	51,55	25,10
50	4	60	50,48	21,49
50	4	40	55,76	29,83
50	4	60	55,61	26,52

TABELA 2.2 - REPRESENTAÇÃO DO CONJUNTO DE DADOS UTILIZADOS PARA TESTE OU VALIDAÇÃO DA VARIÁVEL DEPENDENTE REDUÇÃO DE PESO

Dados de entrada				Dados resposta
Temperatura (°C)	Espessura (mm)	Concentração (°Brix)	Massa total inicial (g)	Massa total final (g)
50	2	40	55,01	31,63
50	2	60	52,26	27,64
50	2	47,5	50,16	28,86
50	3	61	50,78	26,03
30	4	40	55,52	25,11
30	4	60	58,13	23,78
30	2	40	56,49	26,06

FIGURA 2.1 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO CONJUNTO TREINADO E VALIDADO PARA A VARIÁVEL DEPENDENTE REDUÇÃO DE PESO





APENDICE 3 - BANCO DE DADOS E GRÁFICOS GERADOS PELO MODELO DE REDE NEURONAL PARA A VARIÁVEL DEPENDENTE TEMPO, NA SECAGEM CONVECTIVA

TABELA 3.1 - REPRESENTAÇÃO DO CONJUNTO DE DADOS UTILIZADOS PARA O TREINAMENTO DA VARIÁVEL DEPENDENTE TEMPO

Dados de entrada				Dados resposta
Temperatura (°C)	Concentração (°Brix)	Espessura (mm)	Massa total inicial (g)	Massa total final (g)
60,000	40,000	4,000	0,419	1,250
60,000	50,000	3,000	0,649	0,500
60,000	40,000	2,000	0,553	0,500
60,000	30,000	2,000	0,415	0,750
60,000	40,000	2,000	0,553	0,500
60,000	40,000	5,000	0,514	1,250
60,000	50,000	5,000	0,533	1,250
60,000	30,000	2,000	0,534	0,500
50,000	30,000	2,000	0,331	1,000
50,000	30,000	5,000	0,516	1,250
50,000	30,000	5,000	0,373	1,750
50,000	50,000	5,000	0,414	1,500
70,000	30,000	2,000	0,437	0,500
60,000	40,000	4,000	0,491	1,000
60,000	50,000	3,000	0,563	0,750
60,000	40,000	2,000	0,415	0,750
60,000	30,000	2,000	0,534	0,500
60,000	50,000	5,000	0,475	1,500
60,000	35,000	5,000	0,402	1,500

TABELA 3.2 - REPRESENTAÇÃO DO CONJUNTO DE DADOS UTILIZADOS PARA O TESTE OU VALIDAÇÃO DA VARIÁVEL DEPENDENTE TEMPO

Dados de entrada				Dados resposta
Temperatura (°C)	Concentração (°Brix)	Espessura (mm)	Massa total inicial (g)	Massa total final (g)
50,000	30,000	2,000	0,462	0,750
50,000	30,000	5,000	0,439	1,500
70,000	30,000	5,000	0,400	1,250
60,000	40,000	5,000	0,436	1,500
70,000	50,000	2,000	0,481	0,500
50,000	50,000	5,000	0,369	1,750
60,000	40,000	5,000	0,387	1,750
60,000	35,000	5,000	0,475	1,250
60,000	35,000	5,000	0,342	1,750
70,000	30,000	5,000	0,460	1,000
70,000	30,000	5,000	0,356	1,500
70,000	50,000	5,000	0,486	1,000
70,000	50,000	5,000	0,429	1,250
50,000	50,000	5,000	0,476	1,250

FIGURA 3.1 REPRESENTAÇÃO DO CONJUNTO TREINADO E VALIDADO PARA A VARIÁVEL DEPENDENTE TEMPO NA SECAGEM CONVECTIVA

